



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

MODELADO Y ANÁLISIS DE MECANISMOS PARA FUNCIONES DE PICK & PLACE

Autor: Daniel Gutiérrez Castro

Directora: Cristina Castejón Sisamón

Co-directora: María Jesús Gómez García

Leganés, 25 de Mayo de 2011

Título: MODELADO Y ANÁLISIS DE MECANISMOS PARA FUNCIONES DE POICK & PLACE

Autor: DANIEL GUTIÉRREZ CASTRO

Directora: CRISTINA CASTEJÓN SISAMÓN

Co-directora: MARÍA JESÚS GÓMEZ GARCÍA

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

ÍNDICE GENERAL:

<u>CAPITULO 1. Introducción.</u>	<u>1</u>
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivo del proyecto.	3
1.3 Organización del documento.	4
<u>CAPITULO 2. Herramientas empleadas.</u>	<u>5</u>
2.1 PRO/ENGINEER.....	5
2.1.1 Pro/Mechanism.	5
2.1.2 Pro/Mechanica.	6
2.2 WORKING MODEL 2D.	6
<u>CAPITULO 3. Historia de la Robótica.</u>	<u>8</u>
3.1 La automatización industrial.....	9
3.2 Robot industrial.	10
3.3 Robots de servicio	14
<u>CAPITULO 4. El diseño mecánico.</u>	<u>17</u>
4.1 Fases del diseño mecánico.....	18
<u>CAPITULO 5. Síntesis de Mecanismos.</u>	<u>21</u>
5.1 ¿Qué es Pick & Place?	21
5.2 Selección de mecanismos.....	22
5.3 Descripción de los mecanismos seleccionados.....	24
<u>CAPITULO 6. Modelado de mecanismos en Pro/Engineer.</u>	<u>27</u>
6.1 Generación de las piezas individuales del mecanismo.....	27
6.1.1 Definición del directorio de trabajo.	27
6.1.2 Construcción del esbozo.	27
6.1.3 Extrusión de la pieza.	28
6.2 Ensamblaje.....	30
6.3 Generación de resultados.	32

CAPITULO 7. Análisis cinemático de los mecanismos.	36
7.1 Análisis cinemático del Mecanismo 1.....	38
7.2 Análisis cinemático del Mecanismo 2.....	43
7.3 Análisis cinemático del Mecanismo 3.....	48
7.4 Análisis cinemático del Mecanismo 4.....	53
7.5 Análisis cinemático del Mecanismo 5.....	58
7.6 Resumen de datos y selección de mecanismos.....	63
CAPITULO 8. Análisis dinámico de los mecanismos.	66
8.1 Análisis dinámico del Mecanismo 1.....	67
8.2 Análisis dinámico del Mecanismo 2.....	72
8.3 Análisis dinámico del Mecanismo 3.....	77
8.4 Análisis dinámico del Mecanismo 4.....	82
8.5 Análisis dinámico del Mecanismo 5.....	87
8.6 Resumen de datos y selección de mecanismos.....	92
CAPITULO 9. Análisis Energético de Mecanismos.	94
9.1 Análisis energético del Mecanismo 1.....	96
9.2 Análisis energético del Mecanismo 2.....	98
9.3 Análisis energético del Mecanismo 3.....	100
9.4 Análisis energético del Mecanismo 4.....	102
9.5 Análisis energético del Mecanismo 5.....	104
CAPITULO 10. Introducción a la optimización con PRO MECHANICA.	106
10.1 Definición del análisis.....	107
10.2 Extracción de resultados.....	110
10.3 Análisis de optimización.	112
CAPITULO 11. Conclusiones y futuros desarrollos.	114
11.1 Conclusiones.	114
11.2 Futosos desarrollos.....	115
CAPITULO 12. Presupuesto.	116
Bibliografía y Referencias.	118
ANEXOS:	119
A-1. PLANOS DE ELEMENTOS:.....	120
A-2. EXPLOSIONADO DE LOS MECANISMOS:.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1 Clasificación generacional de los robots industriales.</i>	12
<i>Tabla 7.1. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo1.</i>	39
<i>Tabla 7.2. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo1.</i>	40
<i>Tabla 7.3. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo1.</i>	41
<i>Tabla 7.4. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo2.</i>	44
<i>Tabla 7.5. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo2.</i>	45
<i>Tabla 7.6. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo2.</i>	46
<i>Tabla 7.7. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo3.</i>	49
<i>Tabla 7.8. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo3.</i>	50
<i>Tabla 7.9. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo3.</i>	51
<i>Tabla 7.10. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo4.</i>	54
<i>Tabla 7.11. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo4.</i>	55
<i>Tabla 7.12. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo4.</i>	56
<i>Tabla 7.13. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo5.</i>	59
<i>Tabla 7.14. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo5.</i>	60
<i>Tabla 7.15. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo5.</i>	61
<i>Tabla 7.16. Resumen de los datos del análisis cinemático.</i>	64
<i>Tabla 8.1. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.</i>	68
<i>Tabla 8.2. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.</i>	69
<i>Tabla 8.3 Momentos clave del análisis.</i>	69
<i>Tabla 8.4. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.</i>	73
<i>Tabla 8.5. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.</i>	74
<i>Tabla 8.6. Momentos clave del análisis.</i>	74
<i>Tabla 8.7. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.</i>	78
<i>Tabla 8.8. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.</i>	79
<i>Tabla 8.9. Momentos clave del análisis.</i>	79
<i>Tabla 8.10. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.</i>	83
<i>Tabla 8.11. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.</i>	84
<i>Tabla 8.12. Momentos clave del análisis.</i>	84
<i>Tabla 8.13. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.</i>	88
<i>Tabla 8.14. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.</i>	89
<i>Tabla 8.15. Momentos clave del análisis.</i>	89
<i>Tabla 8.16. Resumen de los datos del análisis dinámico.</i>	92
<i>Tabla 8.17. Resumen de los datos del análisis cinemático.</i>	93
<i>Tabla 9.1. Resultados del análisis energético.</i>	96
<i>Tabla 9.2. Momentos representativos del análisis energético.</i>	97
<i>Tabla 9.3. Resultados del análisis energético.</i>	98
<i>Tabla 9.4. Momentos representativos del análisis energético.</i>	99
<i>Tabla 9.5. Resultados del análisis energético.</i>	100
<i>Tabla 9.6. Momentos representativos del análisis energético.</i>	101
<i>Tabla 9.7. Resultados del análisis energético.</i>	102
<i>Tabla 9.8. Momentos representativos del análisis energético.</i>	103
<i>Tabla 9.9. Resultados del análisis energético.</i>	104
<i>Tabla 9.10. Momentos representativos del análisis energético.</i>	105
<i>Tabla A1.1. Lista de materiales.</i>	120
<i>Tabla A.1.2. Dimensiones de los elementos</i>	121

ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1. Gráfico de optimización.....	2
Ilustración 2. Análisis en Working Model 2D.....	7
Ilustración 3. Similitud entre brazo robótico y anatomía humana.....	11
Ilustración 4. Configuración Cartesiana.....	13
Ilustración 5. Configuración Cilíndrica.....	13
Ilustración 6. Configuración Esférica/Polar.....	13
Ilustración 7. Configuración de Brazo Articulado.....	14
Ilustración 8. Configuración SCARA.....	14
Ilustración 9. Gráfico de sectores de actividad de los robots de servicio (19/04/2004) [5].....	16
Ilustración 10. Fases del proceso de diseño mecánico [9].....	18
Ilustración 11. Robot de pick & place “Rockwell Automation” [2].....	21
Ilustración 12. Mecanismos seleccionados.....	22
Ilustración 13. Mecanismo 1.....	24
Ilustración 14. Mecanismo 2.....	25
Ilustración 15. Mecanismo 3.....	25
Ilustración 16. Mecanismo 4.....	26
Ilustración 17. Mecanismo 5.....	26
Ilustración 18. Creación de un esbozo.....	27
Ilustración 19. Esbozo de bulón.....	28
Ilustración 20. Esbozo de barra.....	28
Ilustración 21. Creación de nueva pieza.....	28
Ilustración 22. Importación del esbozo.....	29
Ilustración 23. Extrusión de vacío. Quitar material.....	30
Ilustración 24. Fijar Posición.....	30
Ilustración 25. Conexión tipo PIN.....	31
Ilustración 26. Mecanismo.....	31
Ilustración 27. Selección del eje motor.....	32
Ilustración 28. Selección de condiciones iniciales del motor.....	32
Ilustración 29. Creación de un punto.....	32
Ilustración 30. Herramienta de análisis de mecanismos.....	33
Ilustración 31. Generación de medidas.....	33
Ilustración 32. Extracción de datos.....	34
Ilustración 33. Sistema de coordenadas.....	34
Ilustración 34. SC en el que queremos cambiar la orientación de X.....	34
Ilustración 35. Pestaña Origen.....	35
Ilustración 36. Pestaña Orientación.....	35
Ilustración 37. Resultado final en rojo (vemos que X ha cambiado.....	35
Ilustración 38. Guardar la animación.....	35
Ilustración 39. Mecanismo 1.....	38
Ilustración 40. Gráfico de velocidad del Mecanismo1.....	39
Ilustración 41. Gráfico de velocidad del Mecanismo1.....	40
Ilustración 42. Gráfico de trayectoria del Mecanismo1.....	41
Ilustración 43. Fases del movimiento en el Mecanismo1.....	42
Ilustración 44. Mecanismo 2.....	43
Ilustración 45. Gráfico de velocidad del Mecanismo2.....	44
Ilustración 46. Gráfico de aceleración del Mecanismo2.....	45
Ilustración 47. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo2.....	46
Ilustración 48. Fases del movimiento del Mecanismo2.....	47
Ilustración 49. Mecanismo 3.....	48
Ilustración 50. Gráfico de velocidad del Mecanismo3.....	49
Ilustración 51. Gráfico de aceleración del Mecanismo3.....	50
Ilustración 52. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo3.....	51
Ilustración 53. Fases del movimiento en el Mecanismo3.....	52
Ilustración 54. Mecanismo 4.....	53
Ilustración 55. Gráfico de velocidad del Mecanismo4.....	54
Ilustración 56. Gráfico de aceleración del Mecanismo4.....	55
Ilustración 57. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo4.....	56
Ilustración 58. Fases del movimiento para Mecanismo 4.....	57
Ilustración 59. Mecanismo 5.....	58
Ilustración 60. Gráfico de velocidad del Mecanismo5.....	59
Ilustración 61. Gráfico de aceleración del Mecanismo 5.....	60
Ilustración 62. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo 5.....	61
Ilustración 63. Fases del movimiento del Mecanismo5.....	62
Ilustración 64. Mecanismo 1.....	67

Ilustración 65. Gráfico de reacciones en A (motor)	68
Ilustración 66. Gráfico de reacciones en B.	68
Ilustración 67. Gráfico de reacciones en C.	68
Ilustración 68. Gráfico de reacciones en D.	68
Ilustración 69. Gráfico de reacciones en E.	68
Ilustración 70. Curva de par motor para el Mecanismo 1.	69
Ilustración 71. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 1.	70
Ilustración 72. Secuencia del movimiento del Mecanismo1.	71
Ilustración 73. Mecanismo 2.	72
Ilustración 74. Gráfico de reacciones en A (motor)	73
Ilustración 75. Gráfico de reacciones en B.	73
Ilustración 76. Gráfico de reacciones en C.	73
Ilustración 77. Gráfico de reacciones en D.	73
Ilustración 78. Gráfico de reacciones en F.	73
Ilustración 79. Gráfico de reacciones en E.	73
Ilustración 80. Curva de par motor para el Mecanismo 2.	74
Ilustración 81. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 2.	75
Ilustración 82. Secuencia del movimiento del Mecanismo2.	76
Ilustración 83. Mecanismo 3.	77
Ilustración 84. Gráfico de reacciones en A.	78
Ilustración 85. Gráfico de reacciones en B.	78
Ilustración 86. Gráfico de reacciones en C.	78
Ilustración 87. Gráfico de reacciones en D.	78
Ilustración 88. Gráfico de reacciones en E.	78
Ilustración 89. Gráfico de reacciones en F.	78
Ilustración 90. Curva de par motor para el Mecanismo 3.	79
Ilustración 91. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 3.	80
Ilustración 92. Secuencia del movimiento del Mecanismo3.	81
Ilustración 93. Mecanismo 4.	82
Ilustración 94. Gráfico de reacciones en A.	83
Ilustración 95. Gráfico de reacciones en B.	83
Ilustración 96. Gráfico de reacciones en C.	83
Ilustración 97. Gráfico de reacciones en D.	83
Ilustración 98. Gráfico de reacciones en E.	83
Ilustración 99. Gráfico de reacciones en G.	83
Ilustración 100. Curva de par motor para el Mecanismo 4.	84
Ilustración 101. Gráfico conjunto de reacciones en Mecanismo4.	85
Ilustración 102. Secuencia del movimiento del Mecanismo4.	86
Ilustración 103. Mecanismo 5.	87
Ilustración 104. Gráfico de reacciones en A.	88
Ilustración 105. Gráfico de reacciones en B.	88
Ilustración 106. Gráfico de reacciones en C.	88
Ilustración 107. Gráfico de reacciones en D.	88
Ilustración 108. Gráfico de reacciones en E.	88
Ilustración 109. Gráfico de reacciones en F.	88
Ilustración 110. Curva de par motor para el Mecanismo 5.	89
Ilustración 111. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 5.	90
Ilustración 112. Secuencia del movimiento del Mecanismo5.	91
Ilustración 113. Cuadro de diálogo de motor.	94
Ilustración 114. Velocidad de motor definida por el usuario.	95
Ilustración 115. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 1.	96
Ilustración 116. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 2.	98
Ilustración 117. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 3.	100
Ilustración 118. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 4.	102
Ilustración 119. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 5.	104
Ilustración 120. Abrir pieza en PRO-E.	107
Ilustración 121. Mechanica Model Setup.	107
Ilustración 122. Biblioteca de Materiales de PRO-E.	108
Ilustración 123. Propiedades del material.	108
Ilustración 124. Restricciones del material.	109
Ilustración 125. Selección y colocación de la carga.	109
Ilustración 126. Definición del análisis estático.	110
Ilustración 127. Ventana de selección de resultados.	110
Ilustración 128. Resultados de PRO MECHANICA (Análisis Standard).	111
Ilustración 129. Cuadro de diálogo del análisis de optimización.	112
Ilustración 130. Resultados del análisis de optimización.	113
Ilustración 131. Planos generales de los elementos de construcción.	122

CAPITULO 1. Introducción.

Este proyecto trata de analizar el comportamiento de una serie de mecanismos que pretenden ser utilizados en la práctica como mecanismo de acción en brazos robóticos. Dichos brazos robóticos se diseñarán con vista a realizar funciones de pick & place en líneas de fabricación. La diferencia de estos mecanismos con los que existen en la actualidad es la simplicidad en cuanto al control de la actuación. En el presente estudio, la actuación es llevada a cabo por un sólo motor.

Cada uno de los mecanismos analizados estará compuesto por una serie de eslabones unidos mediante un conjunto de pasador o bulón y arandelas. Para el diseño en 3D se utilizará el programa PRO/ ENGINEER (PRO-E) que, dentro del mismo paquete, nos permite crear tanto la geometría de cada pieza como el ensamblaje del modelo de cada mecanismo. Además el programa cuenta con una serie de herramientas o módulos para realizar distintos análisis mecánicos. En el caso de este proyecto se va a utilizar el módulo PRO/ MECHANISM para simular el mecanismo en movimiento y obtener los resultados cinemáticos y dinámicos deseados. También se realizará una introducción al uso de la aplicación PRO/ MECHANICA para el análisis mediante elementos finitos (en adelante FEM).

El proyecto consistirá en la realización del diseño y análisis de 5 mecanismos diferentes. Tras ello se seleccionará el mecanismo que se considere óptimo de entre los seleccionados y se hará una comparativa a nivel de eficiencia de cada uno de ellos. Para que el proyecto no se extienda innecesariamente y goce de un carácter fundamentalmente práctico, se detallará tanto el proceso de generación de la geometría y del análisis mecánico de los diferentes mecanismos como la introducción a lo que sería una optimización aplicable a cualquiera de los mecanismos utilizados en el proyecto. También se hará una breve introducción teórica sobre la actualidad robótica y el diseño en ingeniería.

El documento recogerá el diseño general de mecanismos mediante Pro-e utilizando como ejemplo uno de los mecanismos de estudio. Es por ello que en el apartado de diseño no aparecerá el diseño detallado de cada uno de los mecanismos, aunque todos ellos han sido diseñados y ensamblados mediante el mismo proceso.

A continuación se exponen, de forma muy breve y simplificada, los pasos a seguir en el modelado y análisis del diseño del mecanismo.

- Creación de secciones a extruir.
- Generación de la geometría en 3D de cada pieza individualmente.
- Ensamblado de las piezas de forma que las conexiones definan un mecanismo.
- Análisis el mecanismo en PRO MECHANISM.
- Generación del informe de resultados.
- Optimización mediante aplicación PRO MECHANICA.

1.1 Antecedentes.

En una visión general sobre el concepto de optimización y desde el punto de vista de la robótica, ésta es con frecuencia empleada para que una determinada tarea se realice más rápidamente. Pero este no siempre es el caso; por ejemplo, en determinados casos lo más importante es que el sistema consuma menos potencia, por lo tanto, se deben crear sistemas más lentos, pero que estén optimizados con respecto a la velocidad de giro. También se podría optimizar en función de otros parámetros como deformación máxima, alcance máximo, etc. por lo que, en ese caso, se deberían optimizar las dimensiones del mecanismo modificando grosor, longitud de los eslabones, material de construcción o bien una combinación de todas ellas. Por tanto, la optimización se hace siempre con respecto a una o más variables.

Para explicar cómo se resuelve un problema de optimización definiremos como “Función objetivo (FOBJ)” la función que queremos optimizar. La función será óptima cuando ésta alcance un máximo o un mínimo. Denominaremos el máximo como “máx(FOBJ)” y el mínimo como “min(FOBJ)” y será igual al máximo del inverso de la función objetivo, es decir, “min(FOBJ) = máx(1/FOBJ)”.

Además de la función objetivo, en el problema aparecen una serie de variables de diseño con las que se establece una “condición inicial”. Las variables de diseño pueden ser la longitud de las barras, el espesor, el tipo de material, etc. y la condición inicial será el punto de partida a partir del cual se empieza a buscar la optimización modificando las diferentes variables.

Por otro lado, para que la optimización sea efectiva se deben imponer una serie de “restricciones” que permitirán acotar las posibilidades de variabilidad. Podemos elegir de entre las diferentes variables un máximo y/o un mínimo (longitud mínima/máxima de barras, masa del conjunto máxima, espesor máximo y mínimo, etc.). Una vez definidas las restricciones se imponen las variables de diseño a modificar para conseguir el objetivo. Por ejemplo, si la función objetivo que queremos alcanzar es una deformación máxima determinaremos que $f(x) = \text{deformación}$, donde x es la variable a modificar.

Con todos los valores podemos realizar un gráfico y determinar los valores óptimos alcanzados. El método de optimización más empleado es el denominado “gradiente”. En este método se pueden alcanzar distintos valores óptimos según el punto por el que comencemos la optimización (condición inicial). La ilustración 1 muestra en un gráfico el resumen del concepto de optimización.

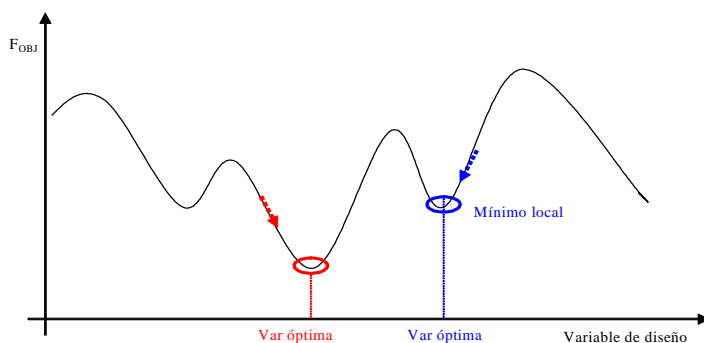


Ilustración 1. Gráfico de optimización.

El motivo de realizar una optimización de un modelo es puramente productivo. El continuo avance tecnológico que existe en la industria, unido a la fuerte competencia en costes, tiempos de producción, calidad y durabilidad de un producto hace necesario que los diseños en la actualidad sean, entre otras cosas, óptimos.

Ciñéndose al ámbito de estudio de este proyecto, se ha procedido en otros años a realizar optimizaciones de mecanismos mediante otras aplicaciones que, quizás, sean menos potentes y por tanto menos eficientes. Es el caso del proyecto fin de carrera de Jorge Tierno Alvite [1].

En dicho documento se puede ver una primera aproximación a una síntesis y optimización multiobjetivo del modelo de uno de los brazos robóticos que se van a analizar en este proyecto. La principal diferencia con el trabajo de Jorge es que en éste se elegía uno de los mecanismos obtenidos de la síntesis en función de características cinemáticas y no se estudiaban el resto de los mecanismos propuestos porque con el desarrollo en Matlab se hacía muy tedioso. En cambio, con la herramienta Pro-e se puede diseñar y analizar de manera más sencilla e intuitiva todos los mecanismos para no elegir el más adecuado hasta el análisis dinámico.

Con motivo de los avances tecnológicos e informáticos, se pretende llegar a una solución optimizada más eficiente y con mayor aplicación a diseños reales.

1.2 Objetivo del proyecto.

El objetivo que se busca en la elaboración de este proyecto es detallar todo el proceso de análisis del mecanismo de un brazo robótico utilizando como medio de consecución el potente programa informático PRO-E.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, este programa se compone de una serie de aplicaciones que permiten realizar distintos estudios ingenieriles y mecánicos a partir de un diseño preeliminar.

Por tanto, este proyecto debe satisfacer varios objetivos secundarios con el fin de poder realizar finalmente la optimización del modelo.

En primera instancia, se detallará la utilidad del programa informático PRO-E, con el que se generará la geometría en 3D, se ensamblará para crear un conjunto en 3D, se realizará el análisis cinemático, dinámico y energético del mecanismo que constituye el brazo robótico para levantar pequeñas cargas mediante el principio del pick & place. Para la última parte (análisis cinemático, dinámico y energético) se utilizará la aplicación interna de PRO-E llamada PRO/ MECHANISM.

El siguiente bloque de estudio será la optimización de los modelos. Para ello se empleará la aplicación PRO/ MECHANICA, en la que se seleccionarán las variables con posibilidad de modificación para obtener el diseño optimizado.

Por último se pretende realizar un estudio de evaluación de PRO-E, dado que es una herramienta de reciente incorporación en la Universidad y algunos de sus módulos aún no han sido utilizados. Para ello se realizará una comparación del análisis cinemático de todos los mecanismos entre PRO-E y WORKING MODEL 2D (WM2D). Los resultados de ambos programas se exportarán a Excel y se procederá a la comparación de los resultados obtenidos y a su posterior análisis.

1.3 Organización del documento.

En los primeros capítulos del documento se pretende establecer un marco teórico sobre la actualidad de la robótica y los pasos a realizar en el diseño de un proyecto industrial, en especial en el campo de la mecánica. También se describirán las aplicaciones empleadas y su utilidad.

En el primer capítulo del documento se presenta una primera aproximación a lo que se va a desarrollar a lo largo del proyecto. Sirve para introducir al lector en el tema a desarrollar.

El capítulo 2 resume la utilidad y las posibilidades que ofrecen las aplicaciones informáticas empleadas en el proyecto que se presenta.

En el capítulo 3 se realizará una distinción entre las aplicaciones del robot industrial y el robot de servicio, además de realizar un breve resumen sobre el origen y la evolución de la robótica y sus aplicaciones.

En el cuarto capítulo del documento se describirán los pasos a realizar en un diseño mecánico, desde la identificación de una necesidad hasta la presentación del proyecto. Se considera importante puesto que todo desarrollo mecánico lleva aparejado un diseño previo a su fabricación.

En el siguiente capítulo, el capítulo 5, se profundizará en el terreno de los mecanismos. Dicho capítulo describe de forma simplificada la tarea de pick & place a la vez que muestra una descripción detallada de los mecanismos a analizar en el presente proyecto y de cómo se ha llegado a ellos.

El capítulo 6 es un pequeño tutorial de los pasos que se han de realizar para la conclusión del modelado y el posterior análisis de los mecanismos descritos con anterioridad.

Los capítulos 7, 8 y 9 son los capítulos de análisis de mecanismos. En orden creciente se presentan los análisis cinemático, dinámico y energético que permiten realizar una selección del mecanismo óptimo para realizar la tarea deseada.

Por último el capítulo 10 muestra de una forma introductoria la elaboración de la optimización de un diseño mediante la aplicación escogida para el desarrollo de este proyecto.

CAPITULO 2. Herramientas empleadas.

2.1 PRO/ENGINEER.

Pro-E es un producto de CAD/CAM/CAE de PTC Corporation (Massachusetts). La versión actual y empleada en este proyecto es la Wildfire 5.0.

Pro-E es un software de diseño paramétrico. Éste es muy popular entre diseñadores mecánicos aunque un poco costoso, pero más económico que otros de su mismo rango como CATIA o Unigraphics. Una de las fortalezas de Pro-E es la implementación de una suite para diseño mecánico, análisis de comportamiento (esfuerzos, térmicos, fatiga, eléctrico) y creación de archivos para CAM.

En este programa podremos realizar el diseño de distintas piezas con un entorno de trabajo dinámico, eficaz e intuitivo que hará más fácil la tarea de diseñar aquello que se desee. A su vez, el programa cuenta con un módulo para realizar el ensamblaje de las distintas piezas diseñadas para crear un conjunto que trabaje solidariamente y así poder analizar todo el conjunto y las interrelaciones entre las distintas partes ensambladas. También permite generar los planos de las piezas, del conjunto y del esquema de ensamblaje entre otras muchas opciones avanzadas con las que cuenta el programa. Por otra parte, PRO-E cuenta con un potente paquete de aplicaciones entre las cuales se encuentran Pro/Mechanism, Pro/Mechanica, Plastic Advisor, Soldadura, Chapa, Tuberías, Cableado y Maniquí. De todas ellas, en este proyecto se van a tratar solamente las dos primeras.

2.1.1 Pro/Mechanism.

Pro/Mechanism es un módulo integrado en PRO-E que permite convertir un conjunto creado con el entorno estándar de PRO-E en el diseño completo de un sistema mecánico. Para ello es necesario crear uniones entre elementos, fuerzas, movimiento, etc. Así mismo, Pro/Mechanism permite simular el movimiento real del sistema para, de esta forma, comprender su funcionamiento y analizar el efecto de las distintas variables mecánicas sobre el sistema.

PRO-E Mechanism Dynamics Option (más conocido por sus siglas MDO) es un paquete mejorado de Pro/Mechanism que permite analizar fuerzas dinámicas con una potente solución para la creación de prototipos digitales. PRO-E MDO permite simular el diseño en condiciones reales gracias a la posibilidad de simular fuerzas dinámicas como la gravedad y la fricción, que interactúan con las fuerzas virtuales deseadas. Esto propone una ventaja en el proceso de diseño, pues brinda la posibilidad de realizar una simulación completa de un mecanismo sin necesidad de crear un prototipo y simularlo en condiciones reales, con gravedad y fricción. Desde un punto de vista comercial, PRO-E MDO ofrece la posibilidad de ahorrar en costes y tiempo de fabricación.

2.1.2 Pro/Mechanica.

PRO-E Mechanica es el segundo módulo con el que se trabajará en el presente proyecto. La utilidad de dicho módulo es conocer el rendimiento estructural y térmico del producto “en el escritorio”, sin necesidad de recurrir de nuevo a la fabricación de un prototipo físico.

Con PRO-E Mechanica, los ingenieros de diseño pueden comprender mejor el rendimiento del producto y, después, optimizar el diseño digital, en una fase anterior del ciclo de diseño, sin necesidad de conocimientos de simulación. La ventaja que ofrece trabajar con PRO-E, es que todos los módulos asociados presentan la misma interfaz de usuario, flujo de trabajo y herramientas de productividad comunes en PRO-E. Esto es una ventaja a la hora de diseñar ya que permite realizar la totalidad del análisis y el diseño en un mismo programa y con el mismo método de trabajo. Esto evita problemas de compatibilidad a la hora de importar geometrías y una enorme facilidad de uso. Además, PRO-E Mechanica analiza los modelos nativos de PRO-E y almacena los análisis en los ficheros de modelo. Esto significa que no se simplifican la conversión y gestión de datos.

PRO-E Mechanica permite analizar el desplazamiento e identificar las áreas de problemas. Una vez actualizado el diseño, se puede volver a ejecutar el análisis fácilmente sin volver a crearlo.

Con la posibilidad de evaluar el rendimiento del producto en la pantalla, Pro-E Mechanica ofrece al diseñador la libertad de explorar nuevas ideas y variaciones de diseño, y después optimizar los diseños. Al mismo tiempo, tendrán la seguridad de que los nuevos diseños cumplirán los requisitos de rendimiento, requerirán menos cambios durante la creación de prototipos físicos y proporcionarán valor superior.

2.2 WORKING MODEL 2D.

Working Model 2D (WM2D) es una aplicación informática de gran utilidad que cuenta con un simulador de movimiento en dos dimensiones que proporciona una visión clara y rápida de cualquier diseño dinámico.

Se encuentra dentro del grupo de herramientas de CAE que permiten crear simulaciones de sistemas mecánicos reales y reducir el tiempo de creación de un producto, mejorando la calidad final y optimizando los cálculos. Esta herramienta ha sido adoptada por miles de ingenieros profesionales para crear y analizar los sistemas mecánicos reales.

Las principales razones para elegir WM2D son la simplicidad de su interface, la facilidad de uso y sobre todo que en la misma pantalla permite conocer la mayoría de los parámetros de interés que afectan al mecanismo que se está estudiando (ilustración 2). En el caso de estudio nos servirá para comprobar los resultados obtenidos en el cálculo de mecanismos con el programa PRO-E.

Las características principales WM2D son:

- Comprueba múltiples características de cualquier sistema mecánico.
- Realizar un refinado rápido de las simulaciones en base a las constantes predefinidas.
- Analiza el último diseño midiendo fuerza, par, aceleración, etc e interaccionando con cualquier objeto.
- Importa los dibujos CAD en 2D en formato DXF.
- Permite la entrada de valores desde: ecuaciones, barras deslizantes o conectores DDE a Matlab y Excel.
- Realiza simulaciones no lineales.
- Permite la creación de cuerpos y puede definir propiedades, velocidad inicial, cargas electrostáticas, etc.
- Simula contactos, colisiones y fricción.
- Analiza estructuras con haces flexibles.
- Ejecuta o edita 'scripts' para optimizar la simulación o documentar modelos.
- Graba los datos de la simulación y crea gráficos de barra o vídeos en formato AVI.

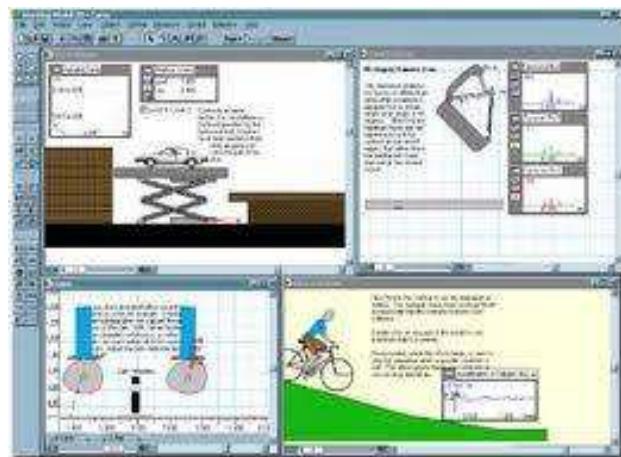


Ilustración 2. Análisis en Working Model 2D.

CAPITULO 3. Historia de la Robótica.

El concepto de máquinas automatizadas se remonta a la antigüedad, con mitos de seres mecánicos vivientes. Los autómatas, o máquinas semejantes a personas, ya aparecían en los relojes de las iglesias medievales, y los relojeros del siglo XVIII eran famosos por sus ingeniosas criaturas mecánicas.

Algunos de los primeros robots empleaban mecanismos de realimentación para corregir errores, mecanismos que siguen empleándose actualmente. Un ejemplo de control por realimentación es un bebedero que emplea un flotador para determinar el nivel del agua. Cuando el agua cae por debajo de un nivel determinado, el flotador baja, abre una válvula y deja entrar más agua en el bebedero. Al subir el agua, el flotador también sube, y al llegar a cierta altura se cierra la válvula y se corta el paso del agua.

El primer auténtico controlador realimentado fue el “regulador de Watt”, inventado en 1788 por el ingeniero británico James Watt. Este dispositivo constaba de dos bolas metálicas unidas al eje motor de una máquina de vapor y conectadas con una válvula que regulaba el flujo de vapor. A medida que aumentaba la velocidad de la máquina de vapor, las bolas se alejaban del eje debido a la fuerza centrífuga, con lo que cerraban la válvula. Esto hacía que disminuyera el flujo de vapor a la máquina y por tanto la velocidad.

El control por realimentación, el desarrollo de herramientas especializadas y la división del trabajo en tareas más pequeñas que pudieran realizar obreros o máquinas fueron ingredientes esenciales en la automatización de las fábricas en el siglo XVIII. A medida que mejoraba la tecnología se desarrollaron máquinas especializadas para tareas como poner tapones a las botellas o verter caucho líquido en moldes para neumáticos. Sin embargo, ninguna de estas máquinas tenía la versatilidad del brazo humano, y no eran capaces de alcanzar objetos alejados y colocarlos en la posición deseada.

Durante la evolución de la robótica, las capacidades de los robots han experimentado una moderada evolución, soportada tanto por los avances en el software utilizado en su sistema de control y sistema sensorial, como por las aportaciones algorítmicas realizadas por los investigadores en los diversos aspectos involucrados en la robótica. Todo ello ha hecho posible una gran evolución en este campo.

Desde su comienzo se han creado en torno a los robots unas expectativas de capacidades superiores a las que finalmente se han ido logrando. Esta mitificación de las capacidades del robot, en buena medida propiciada por el concepto literario y cinematográfico del término, se ha tenido que enfrentar con la limitada “inteligencia” de la que se les ha podido dotar, que ha restringido su trabajo a la interacción con piezas o herramientas dentro de un entorno muy estructurado, especialmente construido o adaptado para que el robot trabaje con “comodidad” y en el que casi todo está previsto.

Dentro de este entorno, que sin excesivas dificultades puede ser garantizado en una fábrica o taller, el robot ha demostrado su alta eficiencia. Es rápido, preciso, no se cansa y se coordina a la perfección con el resto de robots y máquinas que intervienen en el proceso. Sus actuales prestaciones le permiten con facilidad posicionarse con precisión

submilimétrica, localizar las piezas con las que tiene que interactuar, comunicarse con otros equipos, ser programado mediante eficaces herramientas informáticas, etc. Sin embargo aún tiene limitaciones en su movilidad, en la capacidad de interactuar con el ser humano, en adaptarse a situaciones distintas de las previstas, o en modificar el tipo de actividad al que se dedica.

El desarrollo del brazo artificial multiarticulado, o manipulador, llevó al moderno robot. El inventor estadounidense George Devol desarrolló en 1956 un brazo primitivo que se podía programar para realizar tareas específicas. En 1975, el ingeniero mecánico estadounidense Victor Scheinman, cuando estudiaba la carrera en la Universidad de Stanford, en California, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal Programable (PUMA, siglas en inglés). El PUMA era capaz de mover un objeto y colocarlo en cualquier orientación en un lugar deseado que estuviera a su alcance. El concepto básico multiarticulado del PUMA es la base de la mayoría de los robots actuales.

3.1 La automatización industrial.

Como ya se ha dicho anteriormente, los robots surgieron como herramienta de automatización en las industrias del siglo XVIII. La automatización se define como un sistema de fabricación automática en la que se realizan multitud de tareas repetitivas. Es por ello que el uso de robots es esencial como elemento que no se cansa, es preciso, rápido y efectivo. El término automatización también se ha utilizado para describir sistemas no destinados a la fabricación en los que dispositivos programados o automáticos pueden funcionar de forma independiente o semi-independiente del control humano. En comunicaciones, aviación y astronáutica, dispositivos como los equipos automáticos de conmutación telefónica, los pilotos automáticos y los sistemas automatizados de guía y control se utilizan para efectuar diversas tareas con más rapidez o mejor de lo que podría hacerlo un ser humano.

La evolución de la automatización se basa en 3 principios que son: la división del trabajo, la transferencia de energía y la mecanización de las fábricas, y el desarrollo de las máquinas de transferencia y sistemas de realimentación.

La división del trabajo consiste en la reducción de un proceso de fabricación o de prestación de servicios a sus fases independientes más pequeñas. Se desarrolló en la segunda mitad del siglo XVIII, y fue analizada por primera vez por el economista británico Adam Smith en su libro Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones (1776). La simplificación del trabajo permitida por la división del trabajo también posibilitó el diseño y construcción de máquinas que reproducían los movimientos del trabajador.

A medida que evolucionó la tecnología de transferencia de energía, estas máquinas especializadas se motorizaron permitiendo que su eficiencia aumentase adquiriendo una importante mejora productiva. El desarrollo de la tecnología energética también dio lugar al surgimiento del sistema fabril de producción, que permitía que todos los trabajadores actuaran desde un mismo lugar físico, la fábrica. , también se aplicaron los métodos de control de tiempo y movimientos para mejorar el rendimiento de la producción.

Por su parte, la máquina de transferencia permitió la movilización del producto a fabricar desde un punto de trabajo de una máquina de herramienta a otra distinta, colocando dicha pieza de forma adecuada para la siguiente operación. Los robots industriales, diseñados en un principio para realizar tareas sencillas en entornos peligrosos para los trabajadores, son hoy extremadamente hábiles y se utilizan para trasladar, manipular y situar piezas ligeras y pesadas, realizando así todas las funciones de una máquina de transferencia. En realidad, se trata de varias máquinas separadas que están integradas en lo que a simple vista podría considerarse una sola.

En la década de 1920 la industria del automóvil combinó estos conceptos en un sistema de producción integrado. El objetivo de este sistema de línea de montaje era bajar los costes y, por ende, tener precios más asequibles a la población meta. A pesar de los avances más recientes, éste es el sistema de producción con el que la mayoría de la gente asocia el término automatización

3.2 Robot industrial.

En el año 1995 funcionaban unos 700.000 robots en el mundo industrializado. Más de 500.000 se empleaban en Japón, unos 120.000 en Europa Occidental y unos 60.000 en Estados Unidos. Muchas aplicaciones de los robots corresponden a tareas peligrosas o desagradables para los humanos. En los laboratorios médicos, los robots manejan materiales que conllevan posibles riesgos, como muestras de sangre u orina. En otros casos, los robots se emplean en tareas repetitivas y monótonas en las que el rendimiento de una persona podría disminuir con el tiempo. Los robots pueden realizar estas operaciones repetitivas de alta precisión durante 24 horas al día sin cansarse.

Uno de los principales usuarios de robots es la **industria del automóvil**. La empresa General Motors utiliza aproximadamente 16.000 robots para trabajos como soldadura por puntos, pintura, carga de máquinas, transferencia de piezas y montaje. El montaje es una de las aplicaciones industriales de la robótica que más está creciendo. Exige una mayor precisión que la soldadura o la pintura y emplea sistemas de sensores de bajo costo y computadoras potentes y baratas. Los robots se usan por ejemplo en el montaje de aparatos electrónicos, para montar microchips en placas de circuito.

Las actividades que entrañan gran peligro para las personas, como la localización de barcos hundidos, la búsqueda de depósitos minerales submarinos o la exploración de volcanes activos, son especialmente apropiadas para emplear robots. Los robots también pueden emplearse para explorar planetas distantes. La sonda espacial no tripulada Galileo, de la **NASA**, viajó a Júpiter en 1996 y realizó tareas como la detección del contenido químico de la atmósfera joviana.

En la **medicina** también se está extendiendo el uso de robots. Ya se emplean robots para ayudar a los cirujanos a instalar caderas artificiales, y ciertos robots especializados de altísima precisión pueden ayudar en operaciones quirúrgicas delicadas en los ojos. La investigación en telecirugía emplea robots controlados de forma remota por cirujanos expertos; estos robots podrían algún día efectuar operaciones en campos de batalla distantes.

Para definir lo que se entiende por robot industrial se recurre a la definición impuesta por la RIA (Instituto de Robótica de América). *Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.* La Federación Internacional de Robótica (FIA) lo define como una máquina reprogramable, automática y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento.

La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, por lo que, en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot se usan términos como cintura, hombro, brazo, codo, muñeca, etc. (ver ilustración 3). En cualquier caso, existen algunas diferencias. Por ejemplo, un brazo robótico puede extenderse telescópicamente, es decir, deslizando unas secciones cilíndricas dentro de otras para alargar el brazo. También pueden construirse brazos robóticos de forma que puedan doblarse como la trompa de un elefante. Las pinzas están diseñadas para imitar la función y estructura de la mano humana. Muchos robots están equipados con pinzas especializadas para agarrar dispositivos concretos, como una gradilla de tubos de ensayo o un soldador de arco.

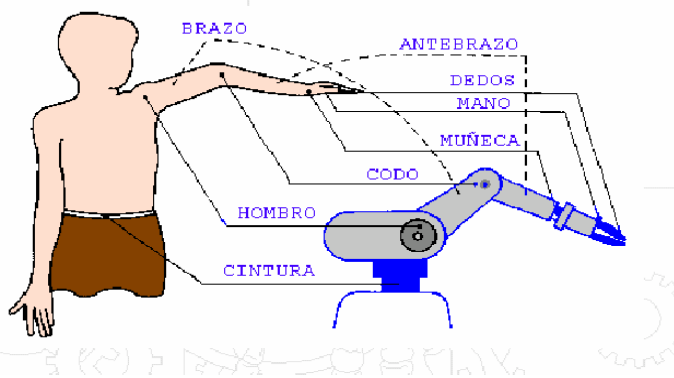


Ilustración 3. Similitud entre brazo robótico y anatomía humana.

La mayoría de los robots industriales responden a la siguiente composición:

En primer lugar presentan un **MANIPULADOR**, que mecánicamente es el elemento principal y está formado por una serie de elementos estructurales sólidos (eslabones) unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones. Dichas articulaciones dotan al robot de al menos un grado de libertad y proporcionan movimientos lineales, angulares o combinación de ambos.

El **CONTROLADOR** es otro de los componentes básicos de los robots industriales. Como su nombre indica, es el que regula cada uno de los movimientos del manipulador, las acciones, cálculos y procesamiento de la información. El controlador recibe y envía señales a otras máquinas por medio de señales entrada/salida y almacena programas. Existen distintos tipos de controlador como son los de posición, cinemático, dinámico y adaptativo. También pueden clasificarse como sistemas de bucle abierto o bucle cerrado. Éste último es el sistema más empleado en la actualidad por su mayor precisión.

El tercero de los elementos constitutivos de los robots responde al nombre de **DISPOSITIVOS DE ENTRADA Y SALIDA** (teclado, monitor y caja de comandos) y permite la comunicación coordinada entre usuario y robot.

Por último, los **DISPOSITIVOS ESPECIALES** se utilizan para dotar al robot de diversos tipos de movimiento (ejes) o sujetar las piezas (estaciones de ensamblaje).

En la tabla 3.1, que se muestra a continuación, se presenta la clasificación de los robots industriales según la generación a la que corresponde. El presente proyecto pertenece a la primera generación de robots que repiten una tarea programada secuencialmente: Los robots de Pick & Place.

Generación	Clasificación de los robots industriales por generaciones			
Primera	Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.			
Segunda	Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.			
Tercera	Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee la capacidad para la planificación automática de sus tareas.			
Clasificación de los robots según T.M.Knasel.				
Generación	Nombre	Tipo de Control	Grado de movilidad	Usos más frecuentes
1 (1982)	Pick & place	Fines de carrera, aprendizaje	Ninguno	Manipulación, servicio de maquinas
2 (1984)	Servo	Servocontrol, Trayectoria continua, progr. condicional	Desplazamiento por vía	Soldadura, pintura
3 (1989)	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto,	Guiado por vía	Ensamblado, Desbardado
4 (2000)	Móvil	Sensores inteligentes	Patas, Ruedas	Construcción, Mantenimiento
5 (2010)	Especiales	Controlados con técnicas de IA	Andante, Saltarín	Militar, Espacial

Tabla 3.1 Clasificación generacional de los robots industriales.

Los tipos de morfología que a los que responden los distintos tipos de robot industrial se describen a continuación. La estructura del manipulador y la relación entre sus elementos proporcionan una configuración mecánica, que da origen al establecimiento de los parámetros que hay que conocer para definir la posición y orientación del elemento terminal. Fundamentalmente, existen cuatro estructuras clásicas en los manipuladores, que se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas en el espacio y que se citan a continuación: cartesianas, cilíndricas, esféricas, angulares. Así, el brazo del manipulador puede presentar cuatro configuraciones clásicas (cartesianas, cilíndrica, esférica y brazo articulado) y una no clásica (SCARA) (Selective Compliance Assembly Robot Arm).

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son con tres articulaciones, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto en el espacio. A continuación se presentan las características principales de las configuraciones del brazo manipulador.

- **Cartesiana / Rectilínea:** El posicionando se hace en el espacio de trabajo con articulaciones prismáticas. Esta configuración se usa bien cuando un espacio de trabajo es grande y debe cubrirse, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. Posee tres movimientos lineales, es decir, tiene tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z. Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales (en línea recta). Esto se puede observar en la ilustración 4.

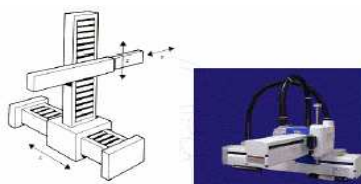


Ilustración 4. Configuración Cartesiana.

- **Cilíndrica:** El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, o sea, que presenta tres grados de libertad. Este robot está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación. La interpolación por articulación se lleva a cabo por medio de la primera articulación, ya que ésta puede realizar un movimiento rotacional. La ilustración 5 muestra un ejemplo de este tipo de robot.

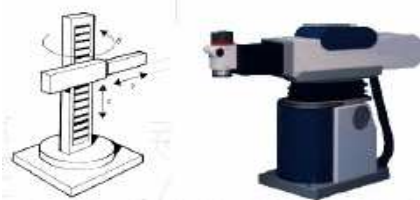


Ilustración 5. Configuración Cilíndrica.

- **Esférica / Polar:** Dos juntas de rotación y una prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones y extender la mano a un poco de distancia radial. Los movimientos son: rotacional, angular y lineal. Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción (ejemplo en la ilustración 6).

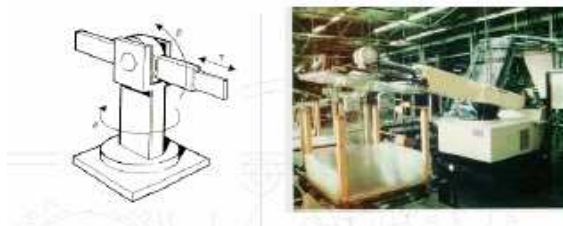


Ilustración 6. Configuración Esférica/Polar.

- **De brazo articulado:** La articulación puede ser esférica, coordinada, rotación o angular. El robot usa 3 juntas de rotación para posicionarse. Generalmente, el volumen de trabajo es esférico. Estos tipos de robot se parecen al brazo humano (véase ilustración 7), con una cintura, el hombro, el codo, la muñeca. Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular.



Ilustración 7. Configuración de Brazo Articulado.

- **SCARA:** Similar al de configuración cilíndrica, pero el radio y la rotación se obtiene por uno o dos eslabones. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El robot de configuración SCARA también puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercera articulación). Puede verse un ejemplo en la ilustración 8.

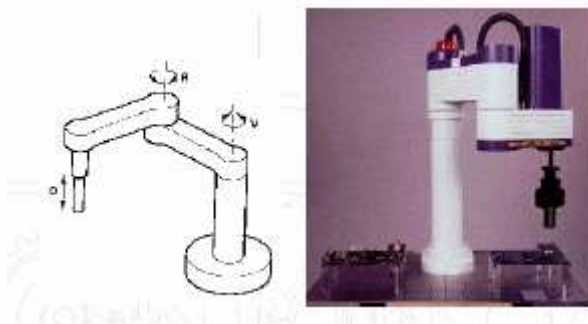


Ilustración 8. Configuración SCARA.

3.3 Robots de servicio

A mediados de los años 80, en los laboratorios y centros de investigación dedicados a la robótica, se trató de revitalizar la importancia de los robots en nuestra sociedad, tratando de sacarle de su entorno productivo y aplicándole a aquellas funciones en las que no se buscaba necesariamente una conjunción de ventajas asociadas al coste de fabricación de un determinado producto. En lugar de ello, se plantearon las ventajas que el uso del robot podía traer en tareas en las que el ser humano asumía importantes riesgos o en las que las capacidades de aquel estaban limitadas por factores como la fuerza o la precisión necesaria.

En la mayor parte de estos casos, el robot debería desarrollar su trabajo en un entorno no especialmente adaptado a sus características, a priori desconocido, continuamente cambiante y con una importante interacción con las personas. Ya que no se trataba en estos casos de un uso industrial de los robots para fabricar bienes, sino de su empleo para desarrollar tareas para las personas, estas nuevas aplicaciones de la robótica se catalogaron como **aplicaciones en el sector servicios**.

Estos esfuerzos por aplicar al robot fuera de las fábricas han tenido importantes resultados en sectores como la construcción, la medicina o la agricultura, y son un paso más hacia el robot “personal” cercano al concepto mítico del robot de la ciencia ficción.

Como ocurre para el propio término de “robot”, no es fácil encontrar una definición que delimite correctamente lo qué es un robot de servicio. La Federación Internacional de Robótica (IFR) define a un robot de servicio como ***aquel que trabaja de manera parcial o totalmente autónoma, desarrollando servicios útiles para el bienestar de los humanos y equipos. Pueden ser móviles y con capacidad de manipulación.***

Esta definición es una adaptación de la dada anteriormente por el IPA (Fraunhofer Institute for Produktionstechnik und Automatisierung) que establece que un robot de servicio es un ***dispositivo móvil programable, que desarrolla servicios de manera total o parcialmente automática; entendiendo por servicios a aquellas tareas que no sirven directamente a la industria de fabricación de bienes, sino a la realización de servicios a las personas o a los equipos.***

En la práctica, las actuales y potenciales aplicaciones no industriales de los robots son tan variadas y diferentes, que es difícil encontrar una definición suficientemente amplia y concreta a la vez de un robot de servicio, más aún por cuanto la gran diversificación de estas aplicaciones y el bajo número de sistemas iguales (en muchos casos son sistemas o aplicaciones únicas) dificulta su conocimiento y catalogación

Tratando no obstante de establecer una primera división en estas aplicaciones no industriales de los robots, la IFR ha propuesto clasificarlas en:

- Aplicaciones de Servicio a humanos (personal, protección, entretenimiento, ...)
- Aplicaciones Servicio a equipos (mantenimiento, reparación, limpieza, etc.)
- Otras funciones autónomas (vigilancia, transporte, inspección, etc.)

De una manera más concreta se puede indicar que los robots de servicio operan en sectores y realizan actividades como:

- Espacio
- Construcción
- Médico
- Submarino
- Nuclear
- Limpieza
- Agricultura
- Doméstico y de oficina
- Militar y seguridad
- Ocio y entretenimiento

Se estima que en la actualidad hay unos 1200 robots de servicio operativos, distribuidos en las actividades antes descritas como se muestra en la ilustración 9.

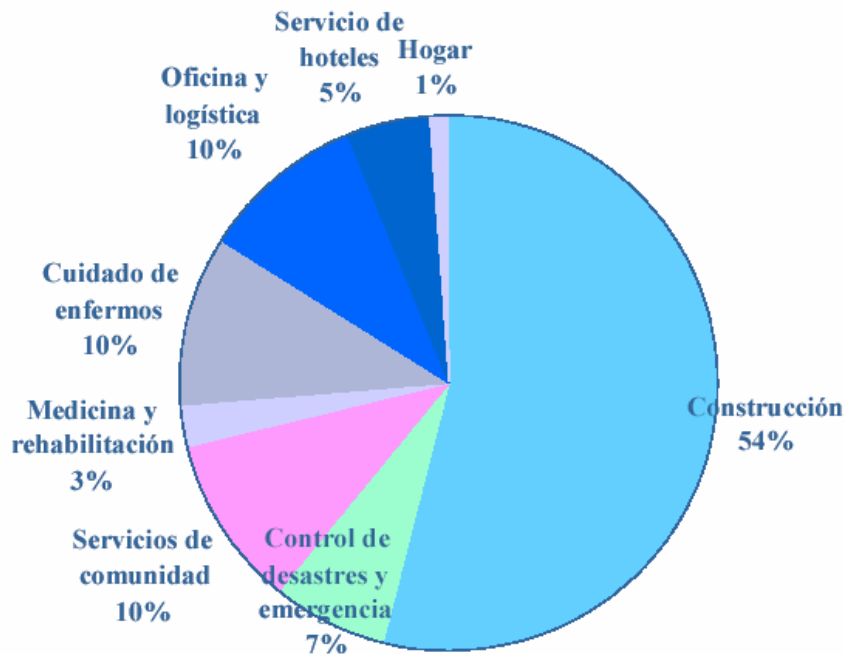


Ilustración 9. Gráfico de sectores de actividad de los robots de servicio (19/04/2004) [5]

Los robots han ampliado su espectro de aplicaciones saliendo de los ambientes estructurados de las fábricas, sustituyendo al ser humano en tareas arriesgadas, llegando a donde él no puede llegar o combinando sus especiales capacidades de precisión y fuerza con la flexibilidad e inteligencia del ser humano.

En el futuro, la mejora en las interfaces de comunicación entre el robot y el usuario, la mejora en la capacidad de captación de información sensorial y en su procesamiento y las nuevas posibilidades que pueda aportar la Inteligencia Artificial, resultarán en una extensión del concepto de robot así como en un uso más amplio de los mismos en actividades muy diversas.

CAPITULO 4. El diseño mecánico.

En el siguiente capítulo se realizará un estudio de los procesos de toma de decisiones con los cuales los ingenieros mecánicos formulan planes para la realización física de máquinas, dispositivos y sistemas. Estos procesos son comunes a todas las disciplinas en el campo del diseño en ingeniería, no sólo para el diseño en ingeniería mecánica.

La definición de diseñar es formular un plan para satisfacer una demanda humana. La necesidad particular que habrá de satisfacerse puede estar completamente bien definida desde el principio, con lo que el objetivo buscado es claro y hacia él irán enfocados todos los esfuerzos del diseño. Por otra parte, el enunciado de una necesidad particular por satisfacer puede ser tan confuso e indefinido, que se requiere de un esfuerzo mental y/o físico considerable para enunciarlo con claridad como un problema que exige solución. Este segundo caso de tipo de diseño se caracteriza por el hecho de que ni la necesidad ni el problema a resolver han sido identificados (o al menos no con claridad). También puede darse la situación en la que el caso puede implicar no uno, sino muchos problemas a resolver.

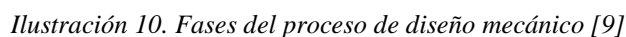
Existe un número interminable de casos mediante los cuales podemos realizar una clasificación de los tipos de diseño. Pueden ser diseños de vestuario, de interiores, de carreteras, de edificios y siguiendo así se tendría una inmensa lista de casos. En comparación con los problemas matemáticos o puramente científicos, los problemas de diseño no tienen una única solución correcta. Además, una respuesta que puede ser considerada correcta o buena en un momento dado, en otro momento puede resultar errónea e insuficiente.

Por tanto, se puede concluir en que existen multitud de factores que intervienen en las fases de diseño. En los problemas de diseño hay un gran número de complejos factores interrelacionados que influyen en la obtención de la mejor solución al problema propuesto. Sin embargo, todo problema de diseño está ligado a una serie de restricciones. En cualquier caso, la solución obtenida para un problema de diseño podría ser óptima.

Un problema de diseño no es un problema hipotético en absoluto. Todo diseño tiene un propósito concreto: ***La obtención de un resultado final al que se llega mediante una acción determinada o por la creación de algo que tiene realidad física.*** En ingeniería, el término diseño puede tener diferentes significados para distintas personas. En cualquier caso, independientemente del nombre, la función de diseñar en ingeniería responde al proceso en el que se utilizan principios científicos y métodos técnicos para llevar a cabo un plan que satisfará cierta necesidad o demanda.

La temática de este proyecto responde a la rama de diseño en ingeniería mecánica. El diseño mecánico es el diseño de objetos y sistemas de naturaleza mecánica: máquinas, aparatos, estructuras, dispositivos e instrumentos. En su mayor parte, el diseño mecánico hace uso de las matemáticas, la ciencia de los materiales y la ciencia de la mecánica aplicada. Se trata de un estudio multidisciplinar que engloba y combina diferentes temáticas para conseguir un fin.

En la ilustración 10 se expresa de una forma gráfica el proceso de diseño de un proyecto mecánico, además de las iteraciones (indicadas mediante flechas) que se pueden realizar y que darán como resultado el resultado final.



A veces el diseño comienza cuando un ingeniero se da cuenta de una necesidad y decide hacer algo al respecto. Identificar la necesidad y expresarla en determinado número de palabras es una actividad sumamente creativa pues la necesidad puede manifestarse simplemente como un vago descontento, o bien, por la intuición de una dificultad o en la sensación de que algo no está bien. Por lo general, las necesidades se identifican de repente, a partir de una circunstancia adversa, o bien, de una serie de circunstancias fortuitas que surgen casi al mismo tiempo. Por tanto, la identificación de la necesidad no es algo evidente.

Existe una diferencia bien clara entre el primer paso y el segundo (definición del problema). El problema es más específico. Si la necesidad es tener aire limpio, el problema podría consistir en reducir la descarga de partículas sólidas por las chimeneas de plantas de energía o reducir la cantidad de productos irritantes emitidos por los escapes de los automóviles. La definición del problema debe abarcar todas las condiciones para el objeto que se ha de diseñar. Tales condiciones podrían ser el espacio que deberá ocupar el objeto y todas las limitaciones a estas cantidades. Se puede considerar al objeto como algo colocado en una caja negra, invisible desde fuera. En ese caso se tiene que determinar lo que entrará y lo que saldrá de dicha caja. También habrá que determinar sus características y limitaciones. Las especificaciones definen el costo, la cantidad de piezas a fabricar, la duración esperada, el intervalo o variedad de capacidades, la temperatura de trabajo y la confiabilidad. Entre dichas condiciones sobresalen las velocidades necesarias, las intensidades de alimentación, las limitaciones de temperatura, el alcance máximo, las variaciones esperadas en las variables y las restricciones en tamaño y peso.

Existen muchas condiciones intrínsecas que dependen del ambiente particular del diseñador o de la propia naturaleza del problema. Los procesos de fabricación de que se dispone y las instalaciones de cierta planta industrial son restricciones a la libertad de acción del que diseña; por lo tanto, forman parte de las condiciones intrínsecas. Por ejemplo, una fábrica pequeña tal vez no tenga maquinaria para trabajar metales en frío. Sabiendo lo anterior, el diseñador seleccionará otros métodos de fabricación que se puedan aplicar en la planta. La habilidad y calificación del personal disponible y la situación competitiva son también condiciones o especificaciones inherentes.

Todo lo que limite la libertad de selección del diseñador es una condición o especificación. Por ejemplo, en los catálogos, los fabricantes listan muchos materiales y tamaños de productos, pero muchas veces no pueden surtirlos todos y frecuentemente hay escasez de algunos.

SÍNTESIS, ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN.

Una vez que ha definido el problema y obtenido un conjunto de especificaciones implícitas, formuladas por escrito, el siguiente paso en el diseño es la síntesis de una solución óptima. Ahora bien, esta síntesis no podrá efectuarse antes de hacer el análisis y la optimización, puesto que se debe analizar el sistema a diseñar, para determinar si su funcionamiento cumplirá las especificaciones. Dicho análisis podría revelar que el sistema no es óptimo. Si el diseño no resultase satisfactorio en una de dichas pruebas o en ambas, el procedimiento de síntesis deberá iniciarse otra vez (esto queda reflejado en la ilustración 10 mediante las iteraciones).

Se ha indicado, y se reiterará sucesivamente, que el diseño es un proceso iterativo en el que se pasa por varias etapas, se evalúan los resultados y luego se vuelve a una fase anterior del proceso. En esta forma es posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizarlos y optimizarlos para, después, volver a la fase de síntesis y ver qué efecto tiene esto sobre las demás partes del sistema. Para el análisis y la optimización se requiere que se imaginen modelos abstractos del sistema que admitan alguna forma de análisis matemático. Tales modelos reciben el nombre de modelos matemáticos. Al crearlos, se espera encontrar alguno que reproduzca lo mejor posible el sistema físico real.

EVALUACIÓN Y PRESENTACIÓN.

Como se indica en la ilustración 10, la evaluación es una fase significativa del proceso total de diseño, pues es la demostración definitiva de que un diseño es acertado y, generalmente, incluye pruebas con un prototipo en el laboratorio. En este punto es cuando se desea observar si el diseño satisface realmente la necesidad o necesidades. ¿Es confiable? ¿Competirá con éxito contra productos semejantes? ¿Es de fabricación y uso económicos? ¿Es fácil de mantener y ajustar? ¿Se obtendrán ganancias por su venta o utilización?

La comunicación del diseño a otras personas es el paso final y vital en el proceso de diseño. Es indudable que muchos diseños importantes, inventos y obras creativas se han perdido para la humanidad, sencillamente porque los originadores se rehusaron o no fueron capaces de explicar sus creaciones a otras personas. La presentación es un trabajo de venta. Cuando el ingeniero presenta o expone una nueva solución al personal administrativo superior está tratando de vender o de demostrar que su solución es la mejor. Si no tiene éxito en su presentación, el tiempo y el esfuerzo dedicados a obtener el diseño se habrán desperdiciado por completo.

Quien vende una nueva idea también se vende a sí mismo como originador de ideas. Si se repiten sus éxitos en la venta de conceptos, diseños, soluciones nuevas y cosas semejantes a la dirección o gerencia de una empresa, se hará acreedor a recibir aumentos salariales y ascensos. De hecho, así es como se sube por la escalera del éxito. En esencia hay tres medios de comunicación que se pueden utilizar; La forma escrita, la oral y la representación gráfica. En consecuencia, todo ingeniero con éxito en su profesión tiene que ser técnicamente competente y hábil al emplear las tres formas de comunicación. Una persona con gran competencia técnica que carece de aptitudes para comunicarse en alguna de estas formas encontrará serios obstáculos en su carrera.

CAPITULO 5. Síntesis de Mecanismos.

5.1 ¿Qué es Pick & Place?

Actualmente en la industria es fundamental conseguir el máximo grado de automatización posible. Esto hace que los robots industriales jueguen un papel clave a la hora de fabricar. Hay diversas aplicaciones que pueden desempeñar estos robots. Una de las más sencillas y comunes es la tarea de pick & place.

La tarea de pick & place se utiliza en la industria para una gran variedad de aplicaciones. Básicamente la función que realizan estos robots es coger un producto o un conjunto de productos de un contenedor, una tolva o una cinta transportadora y transportar la carga a un lugar concreto en donde, en general, se realizará la fase de empaquetado o incluso la preparación del producto para otra fase de elaboración. Este método de trabajo se ha extrapolado también a aplicaciones menos industriales como servir como grúa para personas con movilidad reducida o nula y de esta forma poder moverlos de un lugar a otro con absoluta comodidad. También podría servir como brazo para este mismo grupo de personas, con lo que podrían coger objetos, ya sea una bandeja de comida, una televisión portátil o cualquier otro objeto localizado en algún tipo de soporte y transportarlos cerca para poder ser manipulados.

El funcionamiento del pick & place se asemeja a lo descrito a continuación. El sistema está compuesto por una cinta transportadora dotada de un sistema inteligente de localización en donde se realizará el empaquetado del producto transportado. El extremo del brazo está dotado de algún método de reconocimiento o “photo-eye”. De esta forma se realiza una identificación de productos en espera de ser transportados a la cinta transportadora. Los ejes axiales X y Z esperan en el lugar indicado a recibir la orden de “pick”, es decir, coger el producto. Una vez la señal es recibida, estos ejes trabajan solidariamente para transportar el producto a la localización determinada para su empaquetamiento.

Estos motores están accionados normalmente por un servo-motor que permite realizar esta tarea de una manera rápida y controlada. Más abajo, en la ilustración 11 se puede ver una imagen del esquema de uno de los robots para pick & place de la compañía “Rockwell Automation” [2].

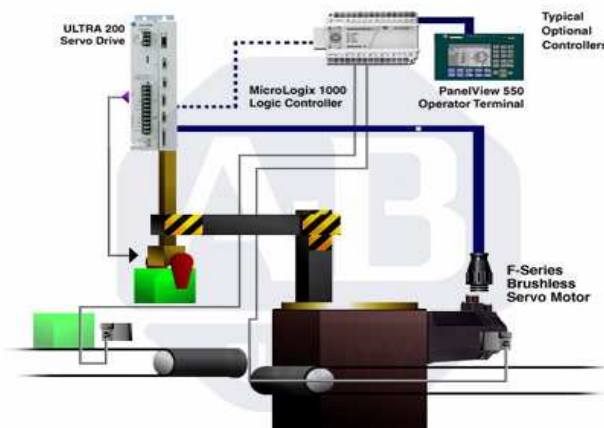


Ilustración 11. Robot de pick & place “Rockwell Automation” [2]

5.2 Selección de mecanismos.

La síntesis y selección de los mecanismos que se modelarán y estudiarán en el presente proyecto fin de carrera se llevó a cabo en el proyecto fin de carrera de Jorge Tierno Alvite [1]. Se puede resumir el proceso de selección de la siguiente manera.

En primer lugar, como requisito de diseño, el brazo robótico debe de ser un mecanismo de **1 grado de libertad**. Mediante una combinación de las **ecuaciones de Gröbler** se llega a la conclusión de que con 1gdl, el mecanismo más sencillo de obtener es un cuadrilátero articulado a partir del cual se pueden obtener diferentes variantes. Éste es un mecanismo muy sencillo y que no aporta mucho valor al diseño. Por tanto, se elegirá una combinación ligeramente más compleja que nos permita realizar un diseño más completo y una mejor optimización. Es el caso de los mecanismos de **6 eslabones**. A este tipo de mecanismos se le pueden aplicar los métodos de reducción de mecanismos con lo que conseguiremos un mejor diseño con menos eslabones y la misma funcionalidad. A continuación, la ilustración 12 muestra los mecanismos seleccionados.

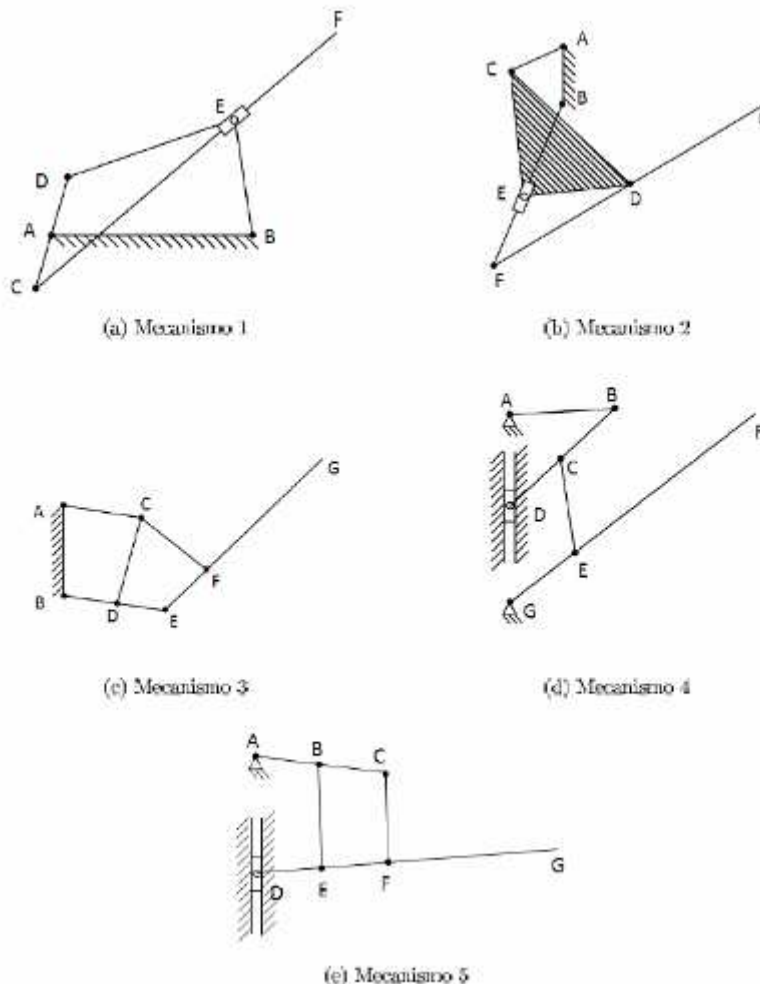


Ilustración 12. Mecanismos seleccionados.

El dimensionamiento de los mecanismos también fue estudiado en dicho trabajo, por lo que en este proyecto presentaremos un breve resumen del proceso. El criterio de diseño seleccionado es la longitud de alcance de los mecanismos. El proyecto consiste en la elaboración de un brazo robótico que realice una determinada trayectoria. Se ha elegido el recorrido aproximado que realiza un brazo humano y se ha idealizado este movimiento como una trayectoria elíptica. Como las trayectorias dibujadas por cada uno de los mecanismos es aproximada a una elipse, midiendo las distancias de sus ejes y utilizando las fórmulas indicadas a continuación (5.2.1 y 5.2.2) se llega a una buena aproximación entre las trayectorias de todos los mecanismos.

$$(5.2.1) \quad A = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$$

$$(5.2.2) \quad B = \sqrt{(X_3 - X_4)^2 + (Y_3 - Y_4)^2}$$

Donde A corresponde a la longitud del eje mayor y B a la del eje menor, siendo (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) los extremos del eje mayor y (X_3, Y_3) y (X_4, Y_4) los del eje menor. Se ha aproximado el espacio de trabajo a las distancias de los ejes mayores y menores obtenidos con el alcance de un brazo humano. Estas distancias son de aproximadamente 50cm para el eje mayor y 7 cm para el eje menor. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 5.1:

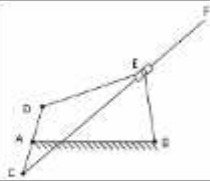
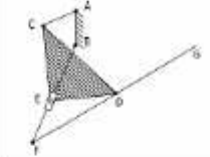
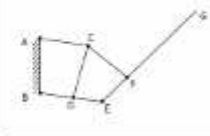
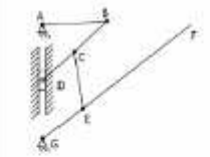
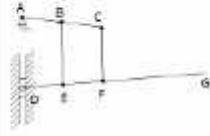
ID	Mecanismo	Dimensiones (mm)	A (mm)	B (mm)
1		$\bar{AB} = 150$ $\bar{DC} = 100$ $\bar{BE} = 170$ $\bar{DE} = 170$ $\bar{CF} = 700$	501,19	72,80
2		$\bar{FD} = 165$ $\bar{BF} = 250$ $\bar{AB} = 100$ $\bar{FG} = 480$ $\bar{AC} = 60$ $\bar{CD} = 232$ $\bar{CE} = 160$ $\bar{DE} = 138$	503,29	70,71
3		$\bar{AB} = 150$ $\bar{CF} = 210$ $\bar{AC} = 80$ $\bar{EG} = 340$ $\bar{BE} = 210$ $\bar{BD} = 135$ $\bar{CD} = 170$ $\bar{EF} = 86$	502,49	178,04
4		$\bar{AB} = 100$ $\bar{GE} = 63$ $\bar{AG} = 200$ $\bar{CE} = 150$ $\bar{BD} = 130$ $\bar{BC} = 65$ $\bar{CF} = 400$	502,89	0
5		$\bar{AC} = 100$ $\bar{DG} = 300$ $\bar{AB} = 50$ $\bar{DE} = 103$ $\bar{BE} = 120$ $\bar{EF} = 64$ $\bar{CF} = 130$	530	56,57

Tabla 5.1. Dimensiones de los mecanismos.

5.3 Descripción de los mecanismos seleccionados.

Para el posterior análisis de los mecanismos propuestos se va a realizar el diseño de cada uno de ellos de forma independiente. La fase de diseño se explicará en el apartado de síntesis de mecanismos con PRO-E (capítulo 6 de este documento).

Sin embargo, algunos mecanismos han tenido que ser modificados para poder cumplir las exigencias del modelo. En algunos casos, se ha girado el mecanismo con el objetivo de conseguir un movimiento de brazo lo más parecido a un movimiento vertical ascendente. El fin de dichos cambios es conseguir que todos los mecanismos realicen la misma función, es decir, el “pick & place” y además la realicen de la forma más similar posible. En otros casos, las distancias propuestas simplemente no permitían la construcción física y real del mecanismo.

Las actuaciones sobre cada uno de los mecanismos así como sus condiciones iniciales y características se detallan a continuación:

- **Mecanismo 1:** Se trata de un mecanismo compuesto por **5 elementos o eslabones (n=5)**. El eslabón AB es el elemento fijo del sistema. No realizará ningún movimiento ni de traslación ni de rotación. El mecanismo está compuesto por **5 pares cinemáticos de 1 GDL ($j_1=5$)** y por **1 elemento corredera de 2 GDL ($j_2=1$)**. Se comprueba mediante el criterio de Grübler que el mecanismo (originalmente formado por 6 eslabones y reducido a 5 mediante una corredera) presenta **1GDL**.

$$GDL = 3(n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2 = 3(5 - 1) - 2 \cdot 5 - 1 = 1gdl$$

Las modificaciones realizadas respecto del mecanismo original se detallan a continuación. El mecanismo se ha girado 90° respecto del mecanismo propuesto en la tabla 5.1 en sentido anti-horario. Se ha cambiado la orientación para que el punto de actuación quede a la derecha del elemento fijo (ver ilustración 13). La posición inicial viene determinada por un ángulo de 45° entre la barra AB y la barra CD. El motor está situado en el punto A y gira en sentido horario.

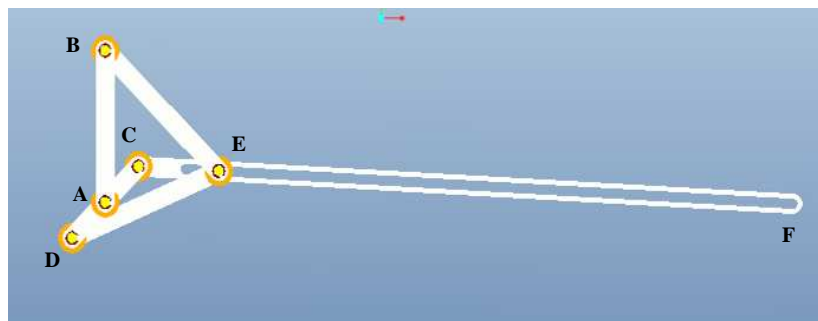


Ilustración 13. Mecanismo 1.

- Mecanismo 2: Se presenta en este caso un mecanismo con un total de 4 eslabones simples y un elemento triangular con 3 conexiones. Como en el caso anterior, el elemento fijo es el eslabón AB. En cualquier caso el mecanismo está compuesto por **5 elementos**, que se conectan mediante **5 pares cinemáticos de 1 GDL** y por **1 elemento corredera de 2 GDL**. Como en el caso anterior, el criterio de Grübler muestra que el mecanismo presenta 1GDL.

$$GDL = 3(n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2 = 3(5 - 1) - 2 \cdot 5 - 1 = 1gdl$$

Según los parámetros que se indican en la tabla 5.1 mostrada en páginas anteriores, el mecanismo 2 no se puede montar porque la longitud de la corredera es demasiado corta. Existen dos soluciones posibles. La primera es reducir el tamaño de la manivela AC. Se ha probado como primera opción a reducir su tamaño de 60 a 40mm (cualquier otro valor superior a 40mm seguía proporcionando errores de montaje). La segunda opción consiste en modificar las longitudes de los lados del triángulo CDE. Aumentando el tamaño de CE se consigue resolver el problema y obtener un movimiento más suave que el obtenido con la manivela de 40mm. Por tanto el nuevo tamaño de CE se ha incrementado pasando de los 160mm originales a los 185mm (ilustración 14). La posición inicial viene determinada por un ángulo de 90° entre la barra AB y la barra AC. El motor está situado en el punto A y gira con en sentido horario.

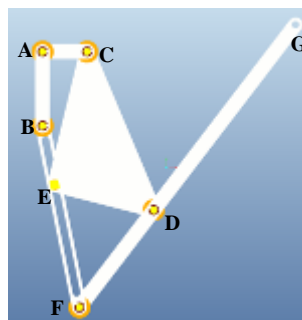


Ilustración 14. Mecanismo 2.

- Mecanismo 3: El mecanismo que se presenta a continuación está compuesto por un total de **6 eslabones simples** en donde el eslabón AB es fijo. Las conexiones entre ellos se llevan a cabo mediante un total de **7 pares cinemáticos de 1 GDL**. Como viene siendo común, el criterio de Grübler muestra que el mecanismo presenta **1GDL**.

$$GDL = 3(n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2 = 3(6 - 1) - 2 \cdot 7 - 0 = 1gdl$$

Esta vez, para que el mecanismo realice un movimiento similar en todos los mecanismos hemos girado el mecanismo 90° en sentido horario respecto del que aparece en la tabla 5.1 (ver ilustración 15). De esta forma la barra AB pasa de ser vertical a horizontal. La posición inicial viene determinado por un ángulo de 75° entre el eslabón AB y el eslabón AC. El motor está situado en A y gira con sentido horario.

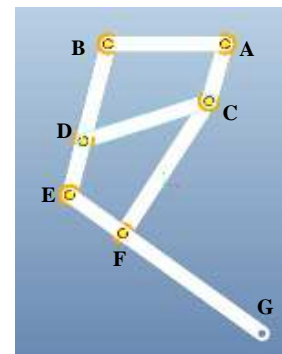


Ilustración 15. Mecanismo 3.

- Mecanismo 4: El mecanismo que se presenta a continuación está compuesto por un total de **5 eslabones simples**. Las conexiones entre ellos se llevan a cabo mediante un total de **5 pares cinemáticos de 1 GDL** y **1 par cinemático de 2 GDL**. El criterio de Grübler muestra que el mecanismo presenta **1GDL**. El eslabón restringido en este mecanismo es la corredera AG.

$$GDL = 3(n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2 = 3(5 - 1) - 2 \cdot 5 - 1 = 1gdl$$

El mecanismo 4 no se puede montar según las especificaciones de medidas recogidas en la tabla 5.1. Para que el mecanismo cumpla con las especificaciones se debe ajustar el recorrido por la corredera de forma que dicho recorrido sea más corto. Después de algunos análisis de prueba y error se ha llegado a una solución efectiva que consiste en alargar la corredera AG de 200 a 250mm y desplazar la conexión en el punto E un total de 77mm. De esta forma, la junta E que estaba a 63mm del punto G pasa a estar a una distancia de 140mm de dicho punto (ver ilustración 16). Las condiciones iniciales de este mecanismo vienen dadas por un ángulo de 75° entre la corredera AG y la barra AB. El motor se encuentra en la junta A y gira en sentido horario.

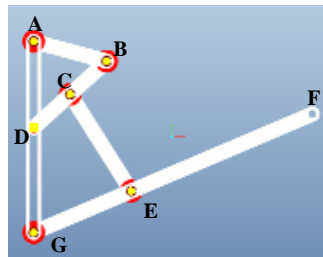


Ilustración 16. Mecanismo 4.

- Mecanismo 5: Por último, el mecanismo 5 tiene una corredera fija definida por los pares AH. Se tienen un total de **5 eslabones simples**. Las conexiones entre ellos se llevan a cabo mediante un total de **5 pares cinemáticos de 1 GDL** y **1 par cinemático de 2 GDL**. El criterio de Grübler muestra que el mecanismo presenta **1GDL**.

$$GDL = 3(n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2 = 3(5 - 1) - 2 \cdot 5 - 1 = 1gdl$$

Las condiciones iniciales del mecanismo 5 están marcadas por un ángulo de 75° entre la corredera AH y el eslabón ABC. El motor está localizado en la junta A y gira en sentido horario (ver ilustración 17).

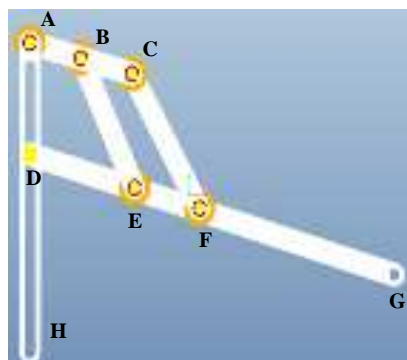


Ilustración 17. Mecanismo 5.

CAPITULO 6. Modelado de mecanismos en Pro/Engineer.

En este apartado se ha seleccionado uno de los mecanismos propuestos en el proyecto para describir el proceso de modelado mediante el programa PRO-E. En este caso, el prototipo se compone de 6 barras unidas mediante bulones y arandelas. Los pasos a seguir para obtener la geometría y restricciones del prototipo son las presentadas en las siguientes secciones.

6.1 Generación de las piezas individuales del mecanismo.

6.1.1 Definición del directorio de trabajo.

El método de trabajo de PRO-E es muy útil debido a que trabaja generando versiones de cada una de las modificaciones de la pieza. De esta forma se puede realizar un seguimiento ordenado de todo el proceso de diseño de la pieza y así recuperar cualquiera de las versiones anteriores de la pieza para trabajar con ella. Por ello es importante definir un directorio de trabajo en el que se irán generando automáticamente todas las versiones de una misma pieza.

El sistema de guardado automático de PRO-E genera además una base de datos mediante la cual podemos llevar un control de cambios en las piezas que generemos. Por ello, definiendo correctamente el directorio de trabajo tendremos organizado en un directorio todos los elementos que afectan al modelo en ejecución. Esta forma de trabajo permite trabajar con orden, rapidez y eficiencia.

6.1.2 Construcción del esbozo.

Una vez definido el directorio de trabajo pasaremos a modelar la pieza. El esbozo debería de ser la primera tarea a realizar para cualquier modelado. Este primer paso permite crear una geometría genérica a partir de la cual se generará la pieza final en 3D. Esto es muy útil porque nos permite, a partir de una geometría inicial crear múltiples piezas simplemente modificando las cotas del dibujo. Para comenzar a esbozar se pulsa el icono “Nuevo” y se selecciona la opción “Esbozo” (ilustración 18), tras lo cual se selecciona el nombre deseado para el esbozo a generar. En el caso de este trabajo se han generado 2 esbozos:

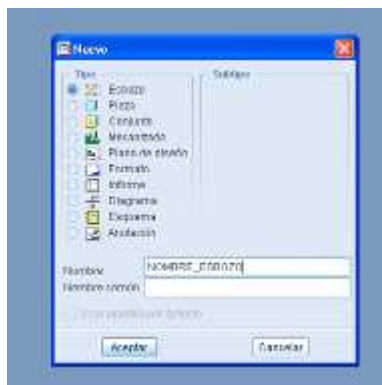


Ilustración 18. Creación de un esbozo.

- **Bulón:** Se puede observar en la ilustración 19 el esbozo a partir del cual se generará la geometría de revolución que constituirá todos los bulones del mecanismo. Al ser una geometría de revolución, se seleccionará como eje de revolución el eje vertical del plano de dibujo.

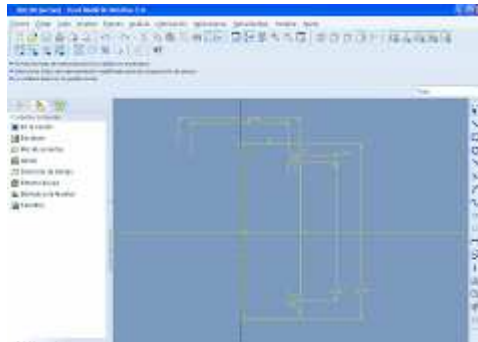


Ilustración 19. Esbozo de bulón.

- **Barras:** En la ilustración 20 se muestra el esbozo general para las barras que conformarán el mecanismo. En este caso la geometría es una geometría plana.

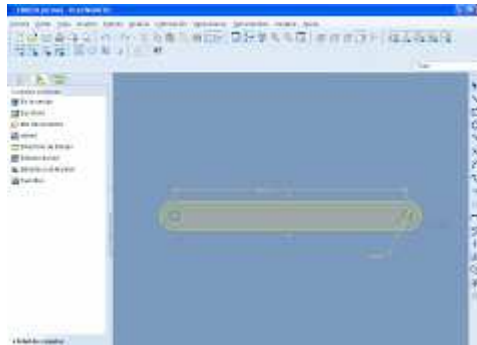
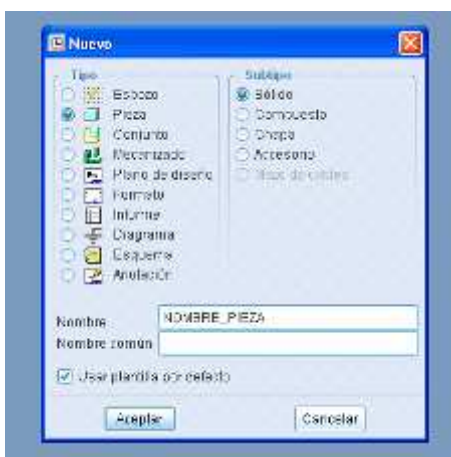


Ilustración 20. Esbozo de barra.

El resto de piezas son únicas, es decir, que el mismo esbozo sirve para generar la geometría en 3D. Es por esta razón que no se generará un esbozo que sirva de modelo genérico sino que se creará la pieza directamente dibujando el esbozo en la misma operación de extrusión.

6.1.3 Extrusión de la pieza.



Una vez generados los esbozos se procede a dimensionar la pieza. Para ello se genera una nueva pieza siguiendo los pasos del apartado anterior (icono “Nuevo”), pero seleccionando esta vez “Pieza” y en subtipo “Sólido” (Ilustración 21).

Se tienen que crear un total de 6 barras, 3 bulones, 1 arandela, 1 casquillo y 1 cierre. Con ello se habrá obtenido el diseño individual de todas las piezas que conformarán el mecanismo.

Ilustración 21. Creación de nueva pieza.

La extrusión de piezas en PRO-E puede ser llevada a cabo básicamente de dos maneras.

La primera es mediante el comando **“Extruir”**. En este caso, una vez generado el esbozo se obtendrán siempre piezas planas mediante la introducción del espesor deseado. En las opciones avanzadas de dibujo se puede seleccionar que el espesor sea simétrico (en ambos sentidos), en un solo sentido, hasta la siguiente superficie o pasante. Los dos últimos casos se suelen emplear para agujeros o taladros.

A la segunda forma de extrusión se accede mediante el comando **“Revolución”**. El proceso es exactamente el mismo, sólo que en este caso la geometría debe contemplar un eje de revolución. Esto es muy útil para diseñar piezas cilíndricas y cuerpos de revolución. Una vez generado el esbozo habrá que seleccionar el ángulo de revolución (1°-360°) en vez de seleccionar un espesor de pieza.

Para la creación de las barras y los bulones se importará la geometría a partir del esbozo. A continuación se describe brevemente la metodología a seguir para la creación de las piezas.

- **Elección del plano de trabajo:** En este apartado se deben seleccionar los planos en los que queremos situar el esbozo. Generalmente utilizaremos el plano FRONTAL para la primera operación, aunque también puede ser de interés generar la pieza desde el perfil. El resto de operaciones vendrán definidas por el interés del diseñador.
- **Extrusión:** Si previamente se ha generado un esbozo se seleccionará en la barra de herramientas la opción **“Esbozo”**, **“Datos de fichero”**, **“Sistema de ficheros”** y se colocará el esbozo en la posición deseada. En el cuadro de diálogo podemos seleccionar la escala deseada y el ángulo de rotación del esbozo (ilustración 22). Tras aceptar procedemos a dimensionar la pieza seleccionando las cotas que deseemos en cada pieza. Si no existe un esbozo previo la metodología es similar, sólo que tras seleccionar el plano de trabajo se deberá dibujar el esbozo.

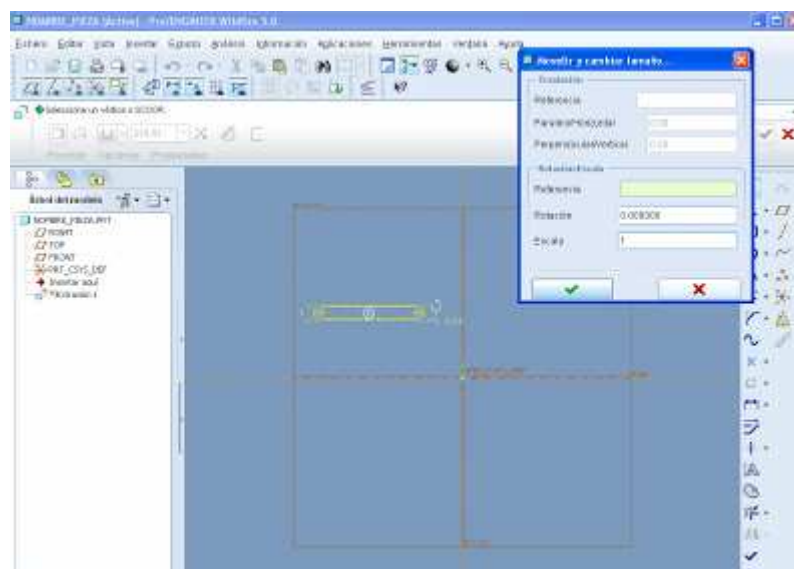


Ilustración 22. Importación del esbozo.

- Seleccione un esbozo. (Si prefiere un esbozo interno, encontrará la opción
- Posición Opciones Propiedades
- Quitar material

6.2 Ensamblaje.

30

En el presente trabajo se ha empleado la conexión “PIN” para todas las uniones. Esta conexión restringe todos los movimientos excepto el de rotación. Para realizarla correctamente se debe realizar una alineación de ejes en primer lugar y seleccionar la restricción plana de forma que las piezas queden conectadas por esta última restricción denominada como traslación (Ilustración 25). Al finalizar la conexión, el programa permite finalizar la misma mediante 2 opciones: que las caras sean coincidentes, en cuyo caso existirá contacto permanente entre ellas, o bien que las caras presenten un cierto desvío. Se seleccionará por tanto un desvío de 2mm, que es el espesor que tendrán las arandelas que van entre las uniones de eslabones.

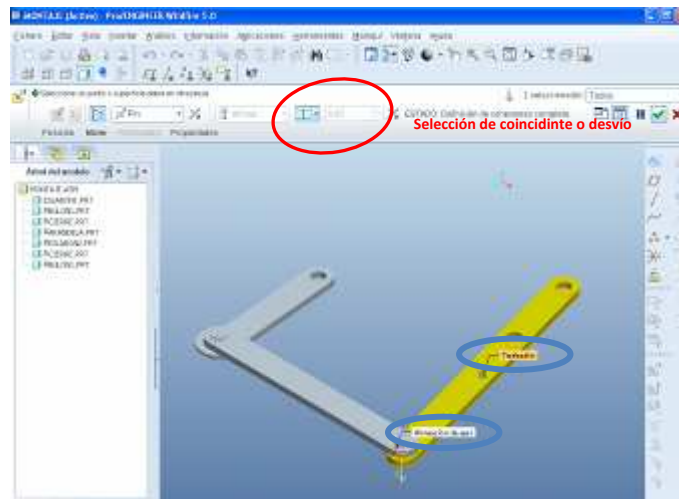


Ilustración 25. Conexión tipo PIN.

En el caso de que el mecanismo presente uniones de tipo correderas (pares de deslizamiento) se procederá de forma similar. Sólo que en este caso tendremos que alinear las caras planas de los elementos en movimiento relativo y posteriormente seleccionar las aristas en movimiento relativo. Todo ello se consigue mediante la conexión de tipo “Corredera”.

Una vez realizadas todas las conexiones se tendrá definido completamente el mecanismo. A partir de entonces se pasará a la aplicación PRO/ Mechanism para realizar la simulación y análisis del mecanismo. Esta aplicación permite obtener una animación del movimiento del mecanismo y generar una serie de resultados en cualquiera de los puntos y posiciones del mecanismo. En la ilustración 26 se muestra una imagen del proceso de ensamblaje finalizado que da como resultado el mecanismo a estudiar.

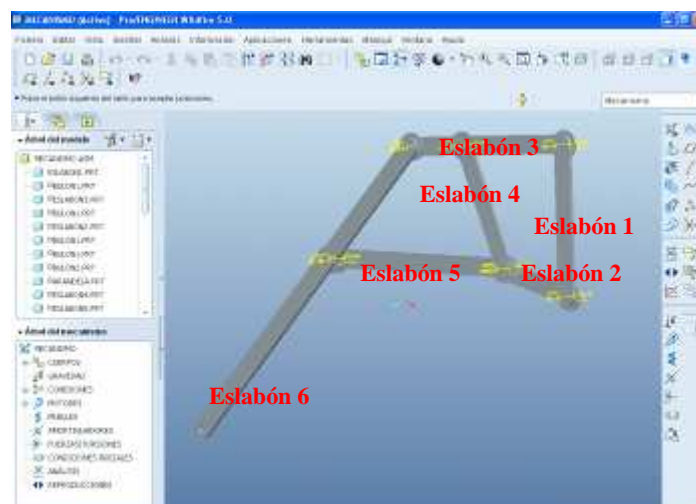


Ilustración 26. Mecanismo.

6.3 Generación de resultados.

Para obtener los resultados en PRO/ Mechanism se debe imponer un actuador que se encargue de generar movimiento al mecanismo en su conjunto. Para ello se empleará la opción de “Motor cinemático” y seleccionaremos el elemento deseado. Una vez realizada la selección, se puede escoger el eje de giro y el criterio de movimiento del motor. En este último aspecto se presentan 3 opciones: posición (grados), velocidad (grados/segundo) y aceleración (grados/segundo²). Además estas opciones se pueden definir como constantes o variables siguiendo una ley sinusoidal, hiperbólica, etc e incluso definiendo una ley por el usuario (tal y como se detallará en el capítulo 9).

En el caso que nos ocupa se ha decidido no considerar el arranque y realizar el estudio del mecanismo en régimen permanente. Se ha seleccionado el motor con una velocidad angular genérica y constante de 10 °/s en el eslabón 2 (manivela) y en sentido horario. Al ser un brazo de robótico, el punto donde se van a generar los resultados es el extremo del eslabón 6. Este punto sería el que realizaría la tarea deseada y por tanto es el punto de interés en cuanto a la velocidad, aceleración y sollicitaciones de la tarea. Dichas sollicitaciones generarán una serie de reacciones que tendrán que ser evaluados en cada eslabón del mecanismo y que son los esfuerzos que debe soportar el motor. Para obtener los resultados deseados es necesario generar un punto en el extremo del eslabón 6. Para ello hay que escoger el comando “Punto” y seleccionar la arista del taladro del eslabón para situarlo en el centro. En el cuadro de referencia aparecerá un nuevo punto al que se le podrá cambiar el nombre y seleccionar la posición deseada. Al lado de la referencia arista se abre un cuadro de diálogo con las opciones encima (para añadir desvío) o centro (centro del círculo). Se seleccionará la opción “Centro” y ya se puede escoger dicho punto para obtener los resultados deseados.

A continuación, en las ilustraciones 27, 28 y 29, se muestran una serie de capturas del proceso de generación de resultados.

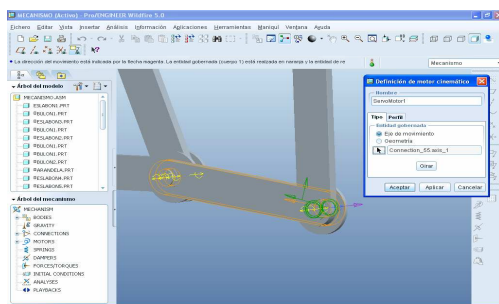


Ilustración 27. Selección del eje motor.

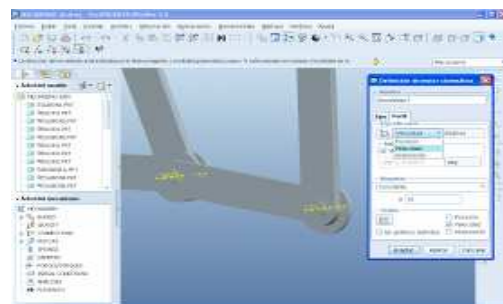


Ilustración 28. Selección de condiciones iniciales del

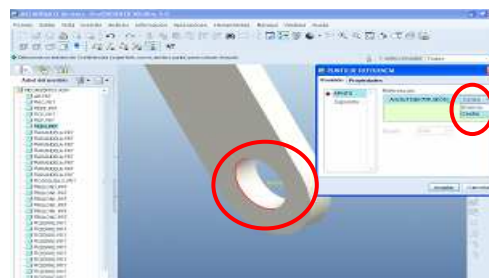


Ilustración 29. Creación de un punto.

Tras seleccionar el motor que generará el movimiento se puede proceder a realizar un análisis del mecanismo, ya sea de posición, estático, dinámico, cinemático, etc. Se podrá visualizar el movimiento del mecanismo, realizar un control de detección de colisiones y extraer una animación del movimiento. En la ilustración 30 se muestra el cuadro de diálogo del análisis. En el caso de estudio se ha escogido una velocidad de paso de 1 segundo y una duración de 120 segundos para el análisis, por lo en el análisis se obtendrán en total 120 marcos (frames), en cada uno de los cuales el programa tomará los datos que se indiquen. Más adelante se explica cómo realizar este proceso.

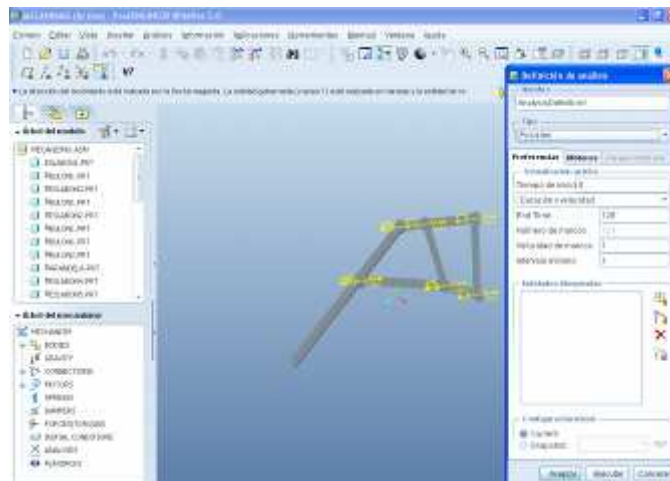


Ilustración 30. Herramienta de análisis de mecanismos.

Una vez realizado el análisis, el programa ya ha generado el cálculo de todos los puntos del mecanismo. Para obtener los resultados deseados se debe de seleccionar la herramienta “Medidas” y elegir las que se consideren oportunas. Las opciones más destacadas son posición, velocidad, aceleración, reacciones, etc. Por último se debe seleccionar el punto en donde se quieren conocer las medidas (generado anteriormente), el sistema de coordenadas de referencia y el análisis del que deseamos conocer los resultados. El siguiente paso es extraer los resultados. La ilustración 31 muestra las imágenes del proceso y los resultados obtenidos en el análisis realizado.

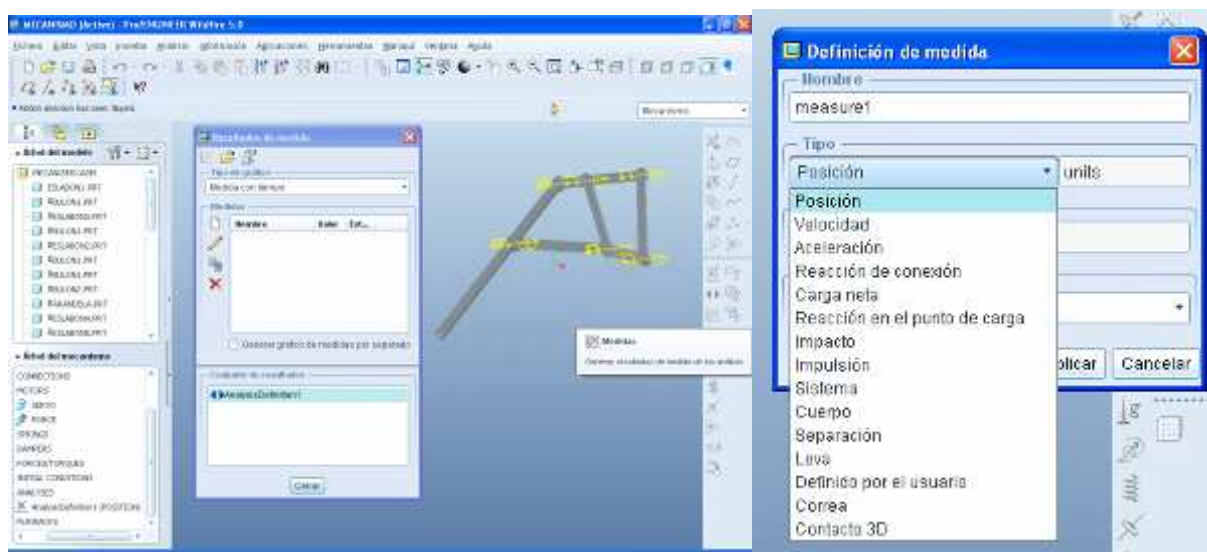


Ilustración 31. Generación de medidas.

El proceso de extracción de datos es muy sencillo. Basta con seleccionar las medidas que queremos extraer en el cuadro de diálogo de la herramienta “**Medidas**” y pulsar en el icono que aparece remarcado en la imagen. Se abrirá una ventana de gráficos en la que se debe seleccionar “Fichero” y pinchar en “**Extraer a Excel**” (ilustración 32). Los gráficos pueden referenciarse con el tiempo o bien con otra medida (posición Y frente a posición X por ejemplo). Para seleccionar la opción deseada, en el cuadro de medidas se puede pinchar en tipo de gráfico y seleccionar entre las 2 opciones que aparecerán: “**Medida con tiempo**” o bien “**Medida con medida**”.

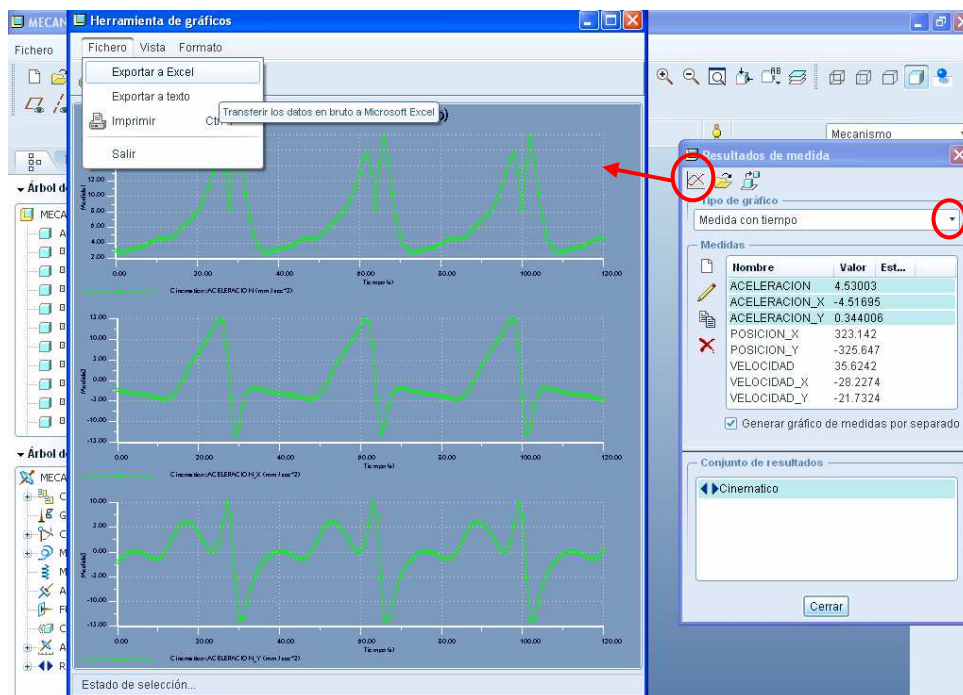


Ilustración 32. Extracción de datos.

En ocasiones, también es útil generar un sistema de coordenadas que servirá de referencia para tomar las medidas, ya que el sistema de coordenadas de los eslabones no tiene por qué coincidir con el sistema tradicional XYZ que aparece en la ilustración 33. Esto, además de permitirnos elegir el origen deseado, facilita el trabajo con las medidas pudiendo tener un criterio común para todas las medidas y de forma que el signo no aporte confusión.

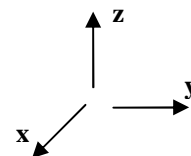


Ilustración 33. Sistema de coordenadas.

Para crear un sistema de coordenadas, primero se selecciona la herramienta “Sistema de coordenadas”. Se abrirá un cuadro de diálogo que permitirá seleccionar las referencias para situar el nuevo sistema de coordenadas. En él aparecerán 3 pestañas. “**Origen**” permitirá posicionar el centro del eje de coordenadas. Esto se puede hacer mediante un punto creado anteriormente, un eje coordenado existente o algún elemento del eslabón. La siguiente pestaña es “**Orientación**” y permite seleccionar la orientación de los ejes. Existen 2 opciones, “**Selector de referencias**” o “**Ejes del scoor seleccionado**”. La segunda toma como referencia los ejes del sistema de coordenadas



Ilustración 34. SC en el que queremos cambiar la orientación de X.

seleccionado como origen. La segunda es mucho más cómoda, ya que permite utilizar cualquiera de los planos que forman los eslabones y seleccionar cuál de los 3 vectores (X, Y o Z) será normal a dicho plano. Por último, en la pestaña **“Propiedades”** se puede cambiar el nombre al eje.

En las siguientes ilustraciones (desde la 35 hasta la 37) se puede observar el proceso de cambio de sistema de coordenadas.

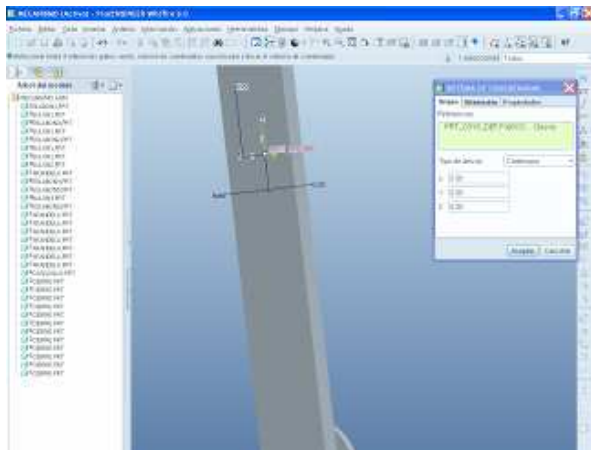


Ilustración 35. Pestaña Origen.

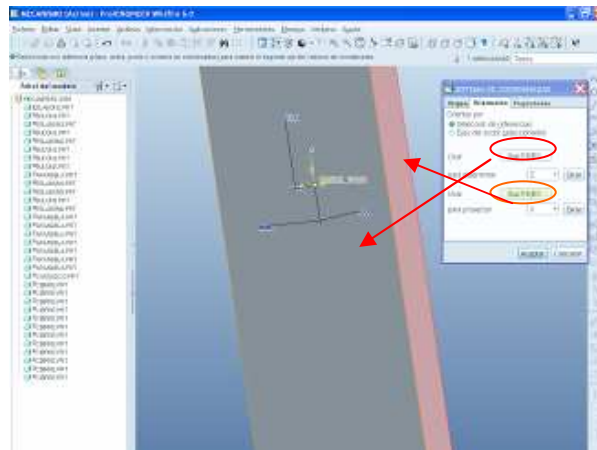


Ilustración 36. Pestaña Orientación.

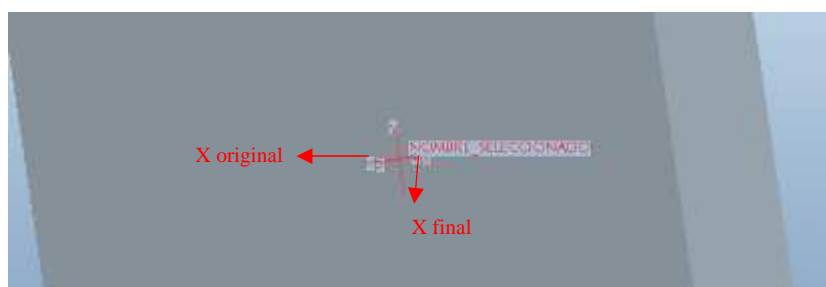


Ilustración 37. Resultado final en rojo (vemos que X ha cambiado).

Por último, para generar la animación del movimiento se selecciona el comando **“Reproducciones”** en donde se podrá elegir el análisis que se desee ver así como configurar la visualización. Pinchando en el icono **“Ejecutar”** (ver ilustración 38) se abrirá el cuadro de diálogo para guardar la animación. Pinchar en **“Grabar”** y seleccionar la ruta del archivo (**“Inspeccionar”**), el formato deseado y otras configuraciones. Pulsar **“Aceptar”** y esperar a que el proceso finalice.

Este proceso se ha seguido para el modelado de los cinco mecanismos presentados en el capítulo 5, comprobando y verificando el diseño, así como realizando las modificaciones de carácter constructivo ya comentadas.

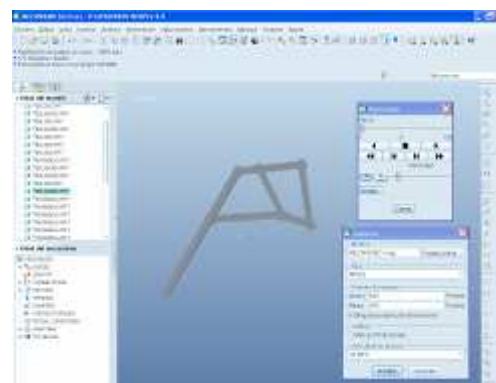


Ilustración 38. Guardar la animación.

CAPITULO 7. Análisis cinemático de los mecanismos.

Una vez descrito el funcionamiento del programa PRO-E, se puede presentar el análisis cinemático de los mecanismos posibles que conforman el brazo robótico.

Las condiciones iniciales de posición, aunque no son necesarias, ayudan bastante a la hora de realizar la comparación con WM2D. Por tanto, se han ajustado las condiciones iniciales en ambos programas para que coincidan, por lo que el primer punto a comparar con WM2D tiene que ser del orden del obtenido con PRO-E. Esto resultará muy útil a la hora de localizar errores de medida debidos a las unidades u otros obstáculos que puedan surgir durante la comparación.

El proceso de obtención de los resultados es un proceso sistemático que se ha de realizar para todos los mecanismos tanto en el programa PRO-E como en WM2D. Para que los resultados sean fáciles de identificar se seleccionarán de entre los resultados tan sólo el primero de los ciclos de la manivela. De esta forma conseguiremos que en la gráfica aparezcan sólo aquellos datos que sean relevantes ya que el resto de resultados será una repetición cíclica.

En este capítulo se expondrán las tablas de análisis cinemático de mecanismos. En ellas se mostrará una columna con los resultados obtenidos mediante PRO-E y otra con los resultados de WM2D. Posteriormente se podrá ver la gráfica que compara ambos resultados. Como las condiciones de simulación son las mismas para los dos métodos de análisis, las gráficas deben de superponerse y en tan sólo se debería de ver una de las dos gráficas, ya que la otra es exactamente igual.

Este análisis se ha realizado de forma individual sobre cada uno de los mecanismos que se han explicado en capítulos anteriores. Dado que ya se ha hablado de las condiciones individuales de cada uno de los mecanismos, a continuación se describirá, de forma breve, las condiciones generales del análisis.

En primer lugar el motor proporcionará todo el movimiento del mecanismo. La velocidad de giro será constante en todos los casos. Por tanto, el par será el que varíe en cada caso y el motor recibirá cualquier esfuerzo al que pueda ser sometido puesto que la velocidad no se verá alterada por ninguna condición externa. La velocidad de giro del motor escogida para realizar los análisis oportunos se ha fijado en 10°/s (0,1745rad/s en el S.I.) y el sentido de giro se corresponde con el de las agujas del reloj, es decir, sentido horario.

El análisis cinemático que se va a realizar pretende describir el movimiento del mecanismo, por lo que los datos a extraer contemplarán la velocidad, aceleración y posición medidas en el extremo del brazo (en donde se ha creado un punto como se indica en el apartado de modelado del capítulo 6). La aceleración y velocidad se medirán en función del tiempo y en valor absoluto. Por su parte, la posición se medirá de tal forma que para cada valor en el eje Y se obtenga el correspondiente en el eje X y, así, obtener la trayectoria que realiza el extremo del brazo en el plano XY. Para ello se seleccionará por ejemplo la medida de posición en el eje X con respecto de la medida de posición en el eje Y.

Para obtener los datos deseados, se realizará una simulación de 120 segundos y 1 iteración (frame) por segundo (en algunas versiones de PRO-E las iteraciones pueden estar nombradas como marcos). Con este análisis se generarán un total de 120 puntos significativos en los que los datos se repetirán cíclicamente puesto que la duración de un ciclo completo es de 36 segundos. Por esta razón no se escogerán más de 40 datos porque incurriríamos en una repetición masiva de datos que no aportaría nada al documento. El motivo de escoger 120 segundos de duración es conseguir más de un ciclo completo y así estar completamente seguros de que no existen perturbaciones en el sistema o errores por parte del usuario que puedan generar errores en el análisis.

Con el fin de validar los modelos realizados en PRO-E, el análisis se llevará a cabo adicionalmente en WM2D. Posteriormente, se extraerán en ambos programas los datos deseados y se exportarán a Excel para realizar la comparativa. Con el objetivo de tener un dato que refleje la exactitud de los datos se calculará el error cometido, de forma que se pueda comprobar que se ha realizado correctamente el diseño del mecanismo en PRO-E.

La razón de realizar una comparación de datos entre ambos programas es evaluar la precisión que aporta PRO-E a la simulación de mecanismos. Se define error relativo como el cociente entre el error absoluto (la diferencia entre el valor de la medida y el valor tomado como exacto) y el valor exacto. Si se multiplica por 100 se obtiene el tanto por ciento (%) de error. El cálculo del error relativo viene determinado por la ecuación 7.1. En dicha ecuación se ha escogido el dato de WM2D como valor exacto debido a que el programa ha sido empleado en multitud de ocasiones por la Universidad Carlos III de Madrid y está comprobada la fiabilidad de sus datos.

$$(7.1) \quad \sigma(\%) = \frac{|DATO_{WM} - DATO_{PRO-E}|}{DATO_{WM}} \cdot 100$$

En las próximas páginas se recogerá un análisis individual de cada uno de los mecanismos en los que se presentará en primer lugar la tabla de datos seguida de la gráfica y un breve comentario acerca de los resultados obtenidos. Se dividirá el estudio en 4 apartados siguiendo el orden:

VELOCIDAD / ACELERACIÓN / TRAYECTORIA / ANÁLISIS
--

7.1 Análisis cinemático del Mecanismo 1.

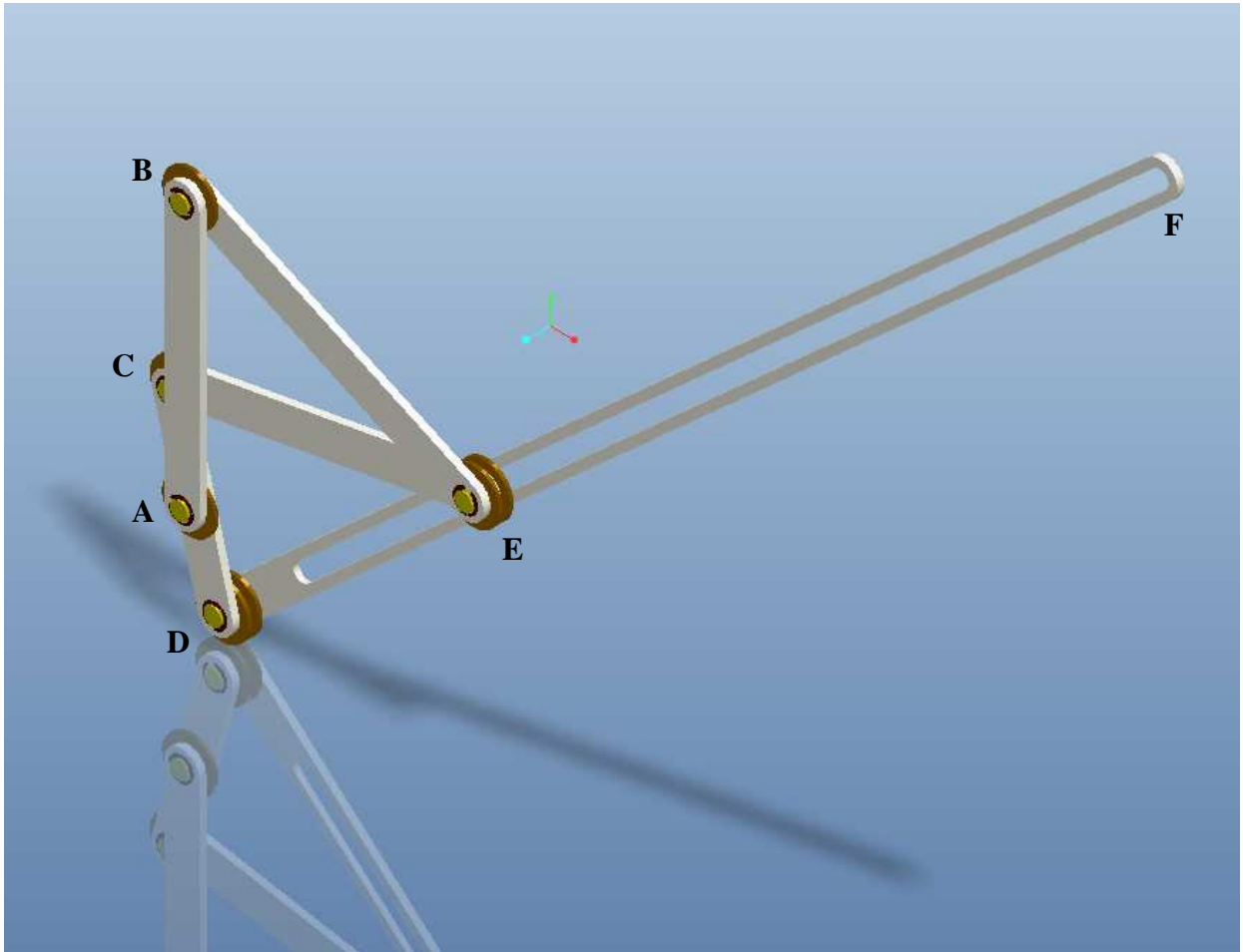


Ilustración 39. Mecanismo 1.

En la ilustración 39 se presenta una captura del ensamblaje del mecanismo 1. A modo de recordatorio se detallan a continuación los aspectos básicos que dominan este mecanismo para posteriormente presentar los datos y análisis del mecanismo.

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 par
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón AB (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)

❖ **Velocidad:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)			Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)	
0	21,031	0	-	20	21,264	21,268	0,017
1	41,322	41,284	0,092	21	25,527	25,531	0,014
2	62,161	62,116	0,072	22	29,137	29,141	0,012
3	76,858	76,826	0,042	23	32,145	32,149	0,012
4	79,266	79,254	0,015	24	34,598	34,602	0,012
5	69,283	69,274	0,013	25	36,522	36,526	0,012
6	52,991	52,982	0,016	26	37,913	37,918	0,013
7	37,066	37,067	0,004	27	38,733	38,738	0,014
8	25,175	25,187	0,048	28	38,898	38,904	0,015
9	18,106	18,122	0,091	29	38,275	38,281	0,015
10	14,885	14,902	0,112	30	36,666	36,672	0,017
11	13,919	13,934	0,108	31	33,790	33,798	0,022
12	13,807	13,821	0,100	32	29,277	29,285	0,028
13	13,298	13,31	0,090	33	22,682	22,692	0,042
14	11,371	11,38	0,080	34	13,815	13,826	0,078
15	7,726	7,731	0,071	35	7,875	7,87	0,058
16	3,484	3,485	0,043	36	21,039	21,014	0,119
17	5,242	5,243	0,015	37	41,322	41,284	0,092
18	10,822	10,824	0,017	38	62,161	62,116	0,072
19	16,330	16,333	0,018	39	76,858	76,826	0,042

Tabla 7.1. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo1.

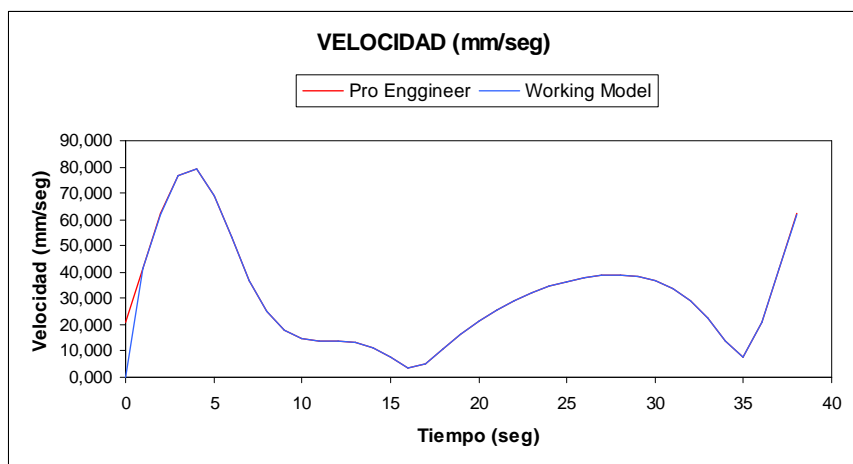


Ilustración 40. Gráfico de velocidad del Mecanismo1.

En la tabla 7.1 se observa que la diferencia entre los datos obtenidos en ambos programas son bastante aproximados. El error máximo no supera el valor del 0.1%. Esto significa que los resultados no dependen del programa que estemos utilizando. Esta conclusión no se aleja de lo esperado, ya que el análisis es exactamente el mismo y lo único que ha cambiado es el programa. Por arrojar un valor numérico del error cometido se puede decir que el error promedio que se comete cambiando de un programa a otro es del 0.045 %, que es un error más que aceptable (ver ilustración 40).

❖ **Aceleración:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)			Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)	
0	19,935	0	-	20	4,603	4,604	0,012
1	22,673	22,666	0,032	21	3,976	3,977	0,022
2	21,224	21,223	0,004	22	3,447	3,448	0,017
3	15,177	15,181	0,030	23	3,027	3,028	0,018
4	13,351	13,342	0,069	24	2,700	2,700	0,014
5	17,924	17,913	0,061	25	2,435	2,435	0,016
6	18,823	18,812	0,057	26	2,204	2,204	0,005
7	15,510	15,502	0,052	27	1,998	1,999	0,051
8	10,593	10,590	0,030	28	1,862	1,863	0,028
9	5,896	5,897	0,013	29	1,954	1,954	0,024
10	2,282	2,284	0,101	30	2,507	2,507	0,004
11	0,360	0,361	0,167	31	3,668	3,667	0,019
12	0,675	0,673	0,301	32	5,500	5,499	0,018
13	1,148	1,151	0,224	33	8,087	8,085	0,028
14	2,845	2,849	0,137	34	11,504	11,501	0,029
15	4,636	4,640	0,081	35	15,659	15,654	0,029
16	5,781	5,784	0,057	36	19,937	19,930	0,034
17	6,119	6,121	0,033	37	22,673	22,666	0,032
18	5,853	5,854	0,018	38	21,224	21,223	0,004
19	5,273	5,273	0,008	39	15,177	15,181	0,030

Tabla 7.2. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo1.

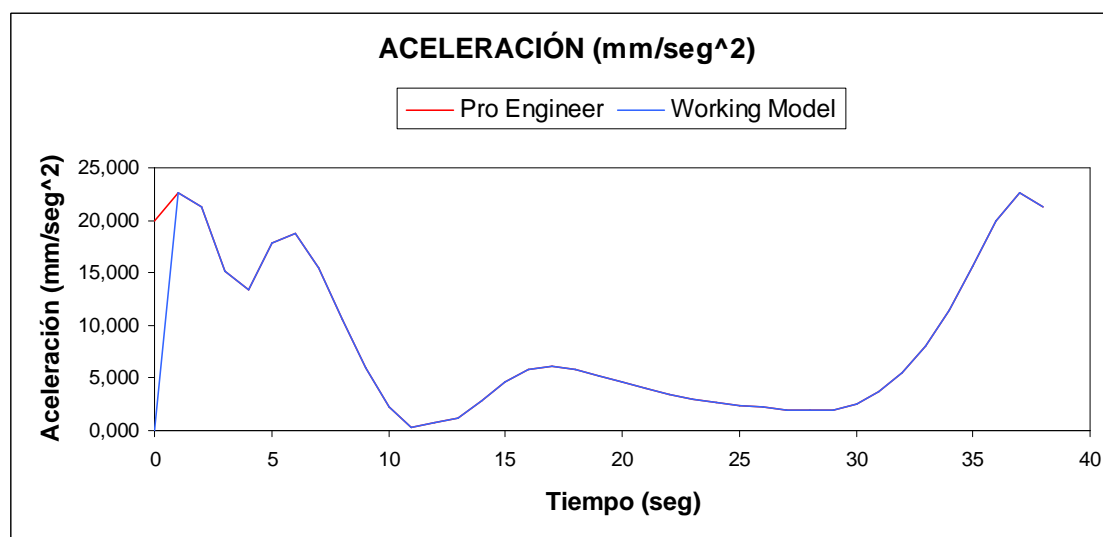


Ilustración 41. Gráfico de velocidad del Mecanismo1.

Siguiendo la tendencia fijada por los datos de velocidad, el error máximo en la presente comparación no supera el 0.1% salvo en algún caso aislado (tabla 7.2). De nuevo el resultado obtenido no se aleja de lo esperado, ya que el análisis es exactamente el mismo y lo único que ha cambiado es el programa. El error promedio cometido en este caso cambiando de un programa a otro es del 0.049 %, que es un error prácticamente nulo (ver ilustración 41).

❖ Trayectoria:

T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)		T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y		X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y
0	734,38	-76,51	734,41	-76,65	0,0029	0,181	20	518,17	319,18	518,22	319,17	0,0089	0,004
1	740,96	-46,26	740,99	-46,55	0,0038	0,624	21	533,45	301,39	533,49	301,37	0,0087	0,006
2	742,78	5,64	742,84	5,26	0,0082	7,211	22	550,79	280,20	550,84	280,17	0,0085	0,008
3	734,66	75,42	734,77	75,02	0,0147	0,529	23	569,41	255,80	569,46	255,77	0,0082	0,011
4	713,61	151,55	713,73	151,28	0,0168	0,177	24	588,58	228,43	588,63	228,40	0,0078	0,014
5	682,70	219,72	682,78	219,62	0,0112	0,043	25	607,66	198,37	607,70	198,34	0,0074	0,019
6	649,27	270,98	649,32	270,96	0,0069	0,008	26	626,07	165,98	626,11	165,94	0,0069	0,026
7	619,44	304,34	619,50	304,32	0,0086	0,008	27	643,34	131,72	643,39	131,67	0,0064	0,036
8	595,47	323,54	595,54	323,49	0,0119	0,014	28	659,10	96,19	659,14	96,13	0,0060	0,057
9	576,67	333,46	576,34	333,58	0,0582	0,033	29	673,08	60,15	673,12	60,08	0,0055	0,102
10	561,19	338,39	561,28	338,33	0,0158	0,018	30	685,18	24,59	685,21	24,52	0,0049	0,281
11	547,23	341,45	547,32	341,39	0,0163	0,017	31	695,46	-9,23	695,49	-9,31	0,0044	0,835
12	533,71	344,47	533,79	344,42	0,0158	0,015	32	704,21	-39,69	704,23	-39,78	0,0037	0,223
13	520,54	348,01	520,61	347,97	0,0142	0,011	33	711,91	-64,69	711,93	-64,80	0,0032	0,159
14	508,57	351,53	508,64	351,51	0,0120	0,007	34	719,21	-81,55	719,23	-81,68	0,0027	0,152
15	499,20	353,89	499,25	353,88	0,0097	0,003	35	726,68	-86,84	726,70	-87,00	0,0024	0,180
16	493,76	353,91	493,80	353,91	0,0084	0,001	36	734,39	-76,44	734,41	-76,65	0,0024	0,274
17	493,04	350,74	493,08	350,74	0,0081	0,000	37	740,96	-46,26	740,99	-46,55	0,0038	0,624
18	497,20	343,95	497,24	343,94	0,0084	0,002	38	742,78	5,64	742,84	5,26	0,0082	7,211
19	505,81	333,41	505,85	333,40	0,0088	0,003	39	734,66	75,42	734,77	75,02	0,0147	0,529

Tabla 7.3. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo1.

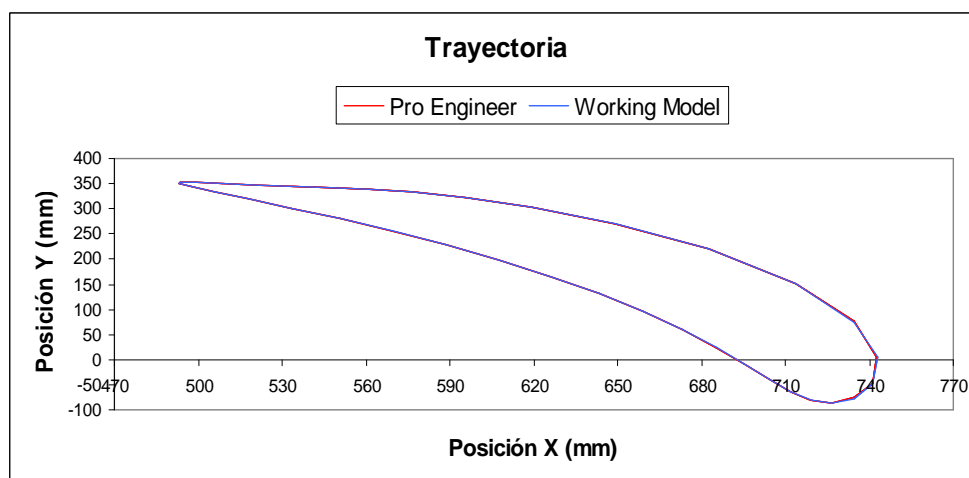


Ilustración 42. Gráfico de trayectoria del Mecanismo1.

En la trayectoria se puede apreciar un incremento en la variación de datos que aumenta el error. Se obtienen en todo caso unos errores medios del 0,01% para los valores de posición en X y del 0,49% para los de Y (tabla 7.3). Son errores más que aceptables teniendo en cuenta que las posiciones de X se relacionan con las de Y y que si cometemos un error pequeño en la medida X, en la medida Y se maximizará el error. En cualquier caso, el gráfico mostrado en la ilustración 42 aporta un resultado bastante satisfactorio. Las dos gráficas están perfectamente superpuestas salvo en el tramo en el que el mecanismo realiza el cambio de trayectoria pasando de un movimiento descendente a uno ascendente, en el que se puede observar un ínfimo error de aproximación.

❖ Análisis global y comentarios:

Para concluir con el análisis cinemático se va a describir brevemente las fases del movimiento en base a la trayectoria, velocidad y aceleraciones resultantes. Se pueden distinguir básicamente 3 fases en el movimiento del mecanismo, tal y como se muestra en la ilustración 43.

En la primera fase, el mecanismo parte desde su posición inicial trazando un movimiento ascendente en el que la velocidad asciende rápidamente hasta su máximo. El gráfico de aceleración muestra también un ascenso bastante brusco cuyo máximo se encuentra aproximadamente en la mitad de la fase y que empieza a disminuir para conseguir el cambio de tendencia en la velocidad que marcará el inicio de la segunda fase. El intervalo descrito anteriormente dura aproximadamente 5 segundos. Este intervalo sería aquel en el que se eleva la carga que se desee situar en el extremo del brazo.

La segunda fase comenzaría aproximadamente hacia el 5º segundo, en donde el mecanismo reduce de forma considerable su velocidad. Esta reducción es prácticamente igual de brusca que el aumento de la primera fase. En el gráfico de aceleración se puede observar que la aceleración vuelve a subir, porque el brazo baja con bastante velocidad y algo antes de la mitad de fase se produce una deceleración que actúa como freno del movimiento. Se estaría hablando del segundo 10, en el que esa deceleración se suaviza hasta casi detener el movimiento del mecanismo en el segundo 15. En este instante el brazo del mecanismo estaría situado en su posición más alta, por lo que el movimiento de ascenso se daría por concluido.

Comienza la tercera fase cuando el brazo del mecanismo cambia su tendencia de ascenso para realizar la trayectoria de descenso. Se puede observar un aumento de velocidad que alcanza su punto máximo y comienza a reducirse con la misma rapidez que el aumento para realizar lo que podría denominarse como movimiento de aproximación. Dicho movimiento se produce en el punto inferior, punto en donde el brazo alcanza su altura mínima que sería aprovechada para recoger la carga deseada. En este caso, el ascenso y descenso de la velocidad es mucho más controlado, pudiendo ver en el mecanismo un movimiento más suave y constante en el caso del descenso. El ciclo terminaría en el segundo 36 y volvería a repetirse de forma invariable.

El gráfico conjunto de velocidad y aceleración en la ilustración 43, muestra con bastante acierto la descripción y duración de las fases anteriormente descritas.

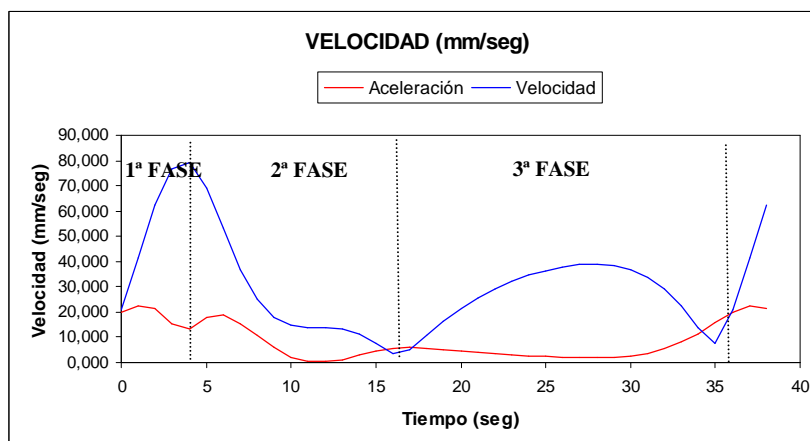


Ilustración 43. Fases del movimiento en el Mecanismo I

7.2 Análisis cinemático del Mecanismo 2.

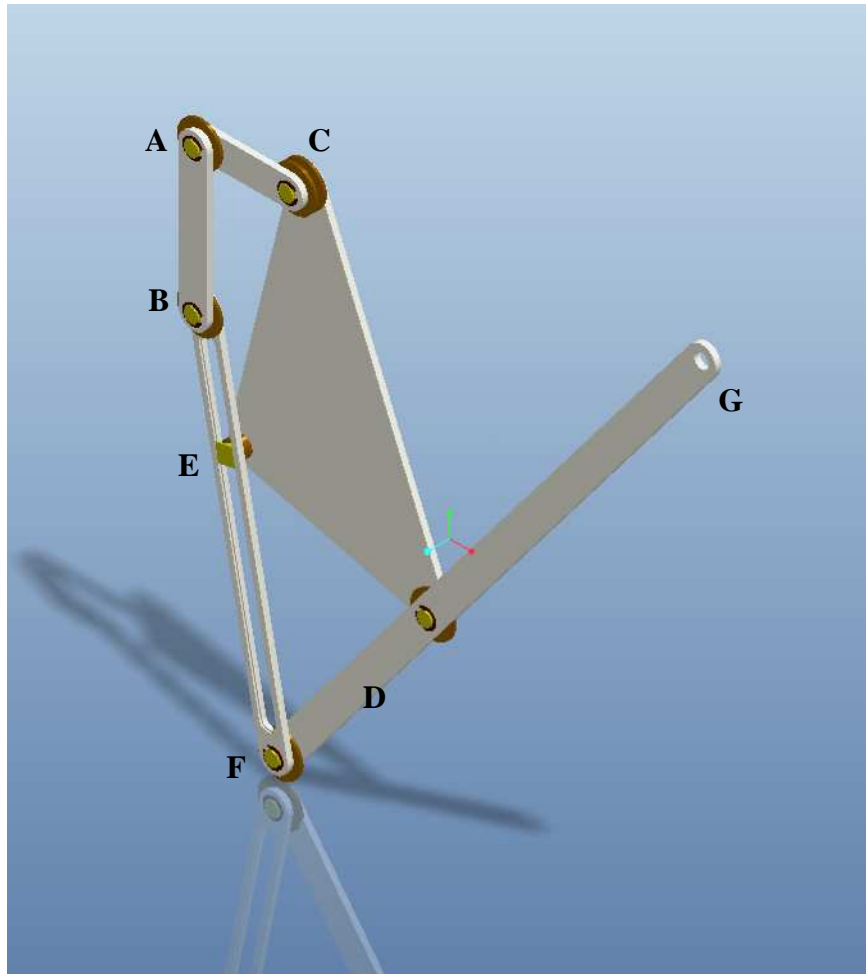


Ilustración 44. Mecanismo 2.

El mecanismo 2 se puede observar en la ilustración 44. Se detallan a continuación las características principales que dominarán el análisis, que será realizado en las páginas siguientes.

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 par
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón AB (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)

❖ **Velocidad:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)			Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)	
0	34,567	0	-	20	7,553	7,550	0,10
1	32,917	32,920	0,06	21	8,579	8,576	0,10
2	30,273	30,277	0,08	22	9,805	9,802	0,09
3	26,290	26,296	0,12	23	11,348	11,345	0,09
4	20,345	20,353	0,18	24	13,308	13,305	0,07
5	11,322	11,333	0,33	25	15,715	15,712	0,07
6	4,696	4,679	0,80	26	18,511	18,509	0,04
7	28,114	28,060	1,03	27	21,555	21,553	0,04
8	65,378	65,226	1,88	28	24,653	24,652	0,03
9	104,792	104,787	0,04	29	27,602	27,602	0,00
10	115,541	115,599	0,54	30	30,225	30,225	0,00
11	94,161	94,061	1,03	31	32,395	32,396	0,02
12	65,045	65,058	0,16	32	34,036	34,037	0,02
13	41,979	41,949	0,46	33	35,106	35,107	0,02
14	26,173	26,172	0,02	34	35,577	35,579	0,03
15	16,020	16,026	0,15	35	35,417	35,419	0,03
16	9,907	9,913	0,18	36	34,567	34,569	0,04
17	6,889	6,892	0,11	37	32,917	32,920	0,06
18	6,192	6,192	0,00	38	30,273	30,277	0,08
19	6,682	6,681	0,05	39	26,290	26,296	0,12

Tabla 7.4. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo2.

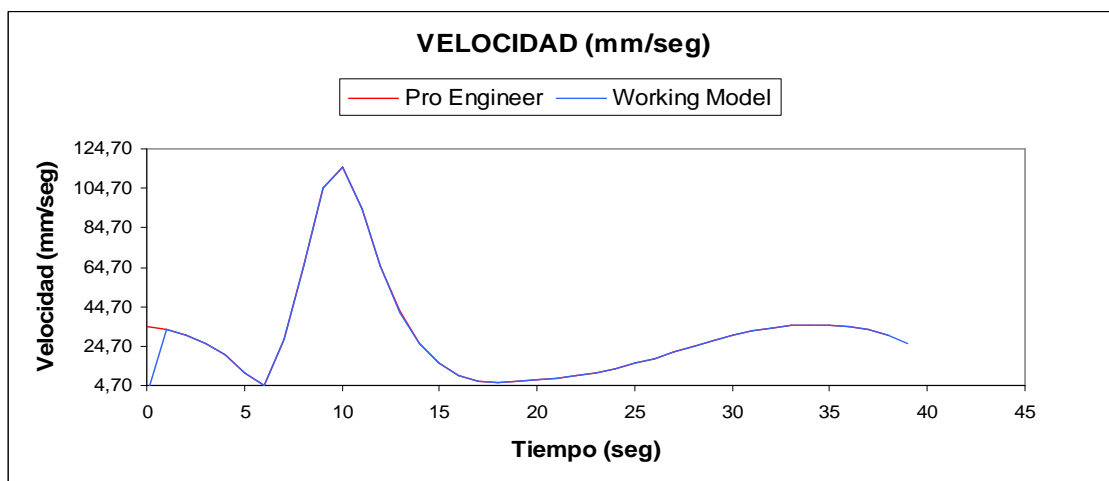


Ilustración 45. Gráfico de velocidad del Mecanismo2.

Se observa en este caso que el error máximo de los datos no supera por lo general el valor de 1%. La tabla 7.4 recoge algunos datos atípicos que, en cualquier caso, no superan el 2% de error. Esto sigue la tendencia de aproximación en los resultados y demuestra que ambos programas arrojan datos más que aproximados. El valor numérico del error promedio cometido cambiando de un programa a otro es del 0,21%. Las gráficas son idénticas como se puede observar en la ilustración 45.

❖ **Aceleración:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)			Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)	
0	3,329	0	-	20	1,869	1,870	0,05
1	3,470	3,470	0,02	21	1,807	1,807	0,03
2	3,931	3,931	0,00	22	1,926	1,927	0,04
3	5,038	5,036	0,08	23	2,165	2,165	0,03
4	7,249	7,247	0,08	24	2,459	2,460	0,05
5	11,321	11,317	0,13	25	2,749	2,749	0,02
6	18,630	18,622	0,19	26	2,977	2,977	0,01
7	30,807	30,788	0,33	27	3,109	3,110	0,05
8	44,173	44,168	0,07	28	3,149	3,149	0,01
9	41,234	41,247	0,20	29	3,137	3,137	0,02
10	35,464	35,469	0,08	30	3,126	3,126	0,02
11	37,483	37,453	0,50	31	3,148	3,149	0,05
12	29,750	29,755	0,08	32	3,200	3,201	0,05
13	20,485	20,462	0,51	33	3,256	3,256	0,01
14	13,480	13,475	0,14	34	3,291	3,292	0,06
15	8,840	8,840	0,01	35	3,303	3,304	0,05
16	5,874	5,875	0,04	36	3,329	3,329	0,02
17	4,004	4,005	0,04	37	3,470	3,470	0,02
18	2,852	2,853	0,04	38	3,931	3,931	0,00
19	2,187	2,188	0,05	39	5,038	5,036	0,08

Tabla 7.5. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo2.

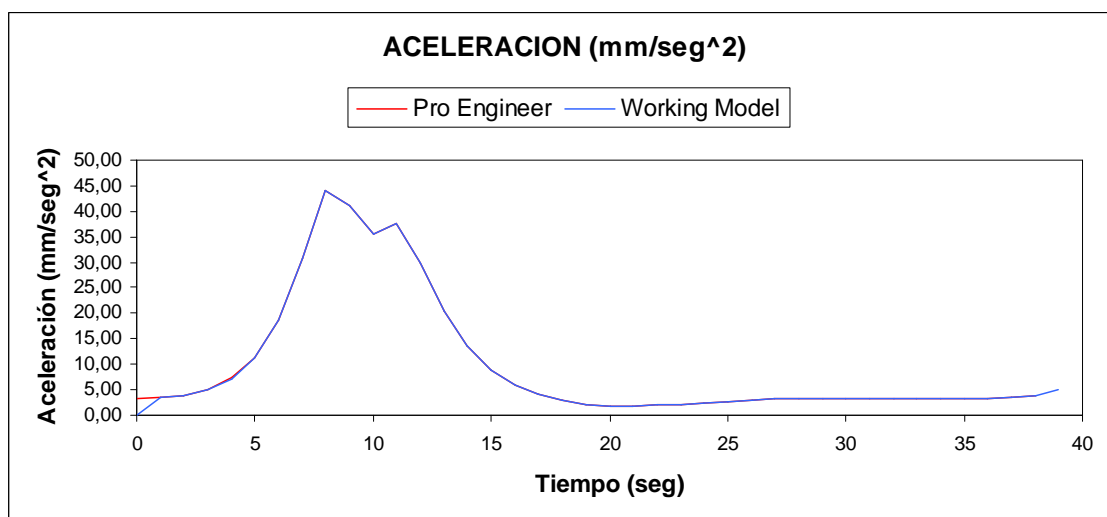


Ilustración 46. Gráfico de aceleración del Mecanismo2.

Los valores de aceleración recogidos en la tabla 7.5 presentan menor dispersión que en el caso de velocidad, siendo el error máximo en la presente comparación del 0,51%. De nuevo, el resultado obtenido no se aleja de lo esperado. El error promedio cometido en este caso cambiando de un programa a otro es del 0,08%, que es un error prácticamente nulo y que se refleja en la gráfica en donde la superposición es total (ilustración 46).

❖ Trayectoria:

T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)		T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y		X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y
0	341,10	86,46	341,09	86,45	0,004	0,020	20	43,42	302,35	43,42	302,33	0,004	0,007
1	357,82	57,07	357,80	57,06	0,004	0,033	21	48,06	295,79	48,06	295,77	0,005	0,006
2	371,13	28,33	371,12	28,31	0,004	0,080	22	54,53	289,30	54,52	289,28	0,013	0,007
3	381,17	1,75	381,16	1,72	0,004	1,633	23	62,93	282,93	62,92	282,91	0,016	0,007
4	388,30	-20,66	388,29	-20,69	0,004	0,172	24	73,49	276,66	73,48	276,64	0,019	0,007
5	393,15	-36,06	393,13	-36,11	0,004	0,133	25	86,52	270,35	86,50	270,33	0,020	0,006
6	396,38	-39,99	396,36	-40,07	0,004	0,198	26	102,26	263,71	102,24	263,70	0,020	0,006
7	397,87	-24,88	397,87	-25,07	0,002	0,757	27	120,88	256,34	120,86	256,33	0,019	0,006
8	393,57	20,87	393,65	20,29	0,020	2,848	28	142,31	247,70	142,28	247,68	0,017	0,005
9	369,92	102,90	369,95	102,79	0,007	0,106	29	166,24	237,18	166,22	237,17	0,014	0,005
10	311,69	200,55	312,07	200,02	0,121	0,265	30	192,12	224,22	192,10	224,21	0,011	0,004
11	234,80	272,20	234,45	272,42	0,154	0,080	31	219,17	208,39	219,15	208,38	0,009	0,005
12	164,96	310,56	165,02	310,51	0,031	0,014	32	246,50	189,44	246,48	189,43	0,007	0,005
13	114,78	326,29	114,64	326,30	0,117	0,002	33	273,17	167,39	273,15	167,38	0,006	0,006
14	81,50	330,80	81,47	330,77	0,037	0,007	34	298,30	142,49	298,29	142,48	0,005	0,008
15	60,82	329,83	60,82	329,81	0,010	0,008	35	321,14	115,26	321,13	115,25	0,004	0,011
16	48,72	326,17	48,73	326,15	0,030	0,007	36	341,11	86,46	341,09	86,45	0,004	0,018
17	42,42	321,08	42,43	321,06	0,031	0,007	37	357,82	57,07	357,80	57,06	0,004	0,033
18	40,11	315,19	40,12	315,17	0,026	0,007	38	371,13	28,33	371,12	28,31	0,004	0,080
19	40,66	308,87	40,67	308,85	0,015	0,007	39	381,17	1,75	381,16	1,72	0,004	1,633

Tabla 7.6. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo2.

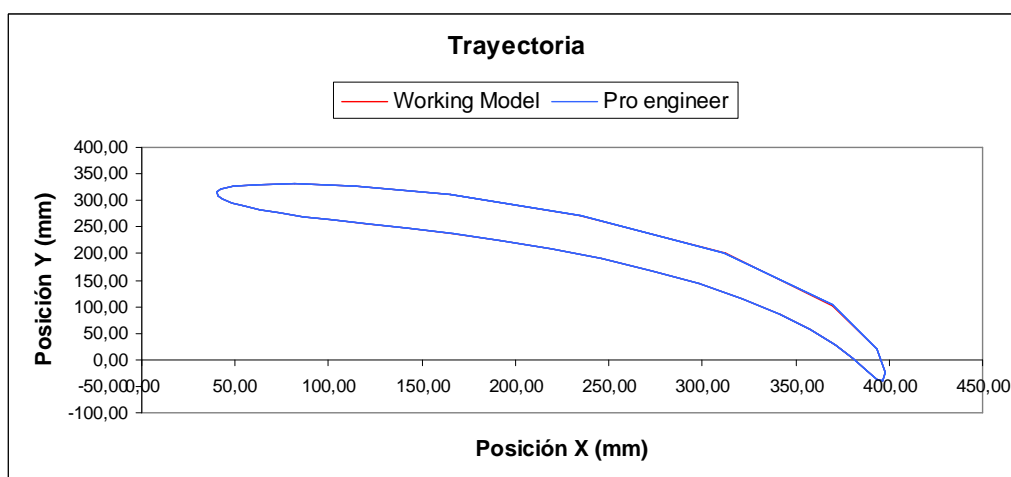


Ilustración 47. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo2.

Como en el caso anterior, para el presente análisis se observa una mayor variación de datos. En el análisis del mecanismo 2, no obstante, existe mayor homogeneidad en los datos obtenidos (tabla 7.6). Como siempre, el error raramente supera el valor del 1% y normalmente está por debajo del 0,1%. El error promedio baja para este análisis situándose en valores de 0,02% para los valores de posición en X y del 0,21% para los de Y. Son errores más que aceptables teniendo en cuenta las condiciones mencionadas. En cualquier caso y como se esperaba, el gráfico mostrado en la ilustración 47 aporta un resultado bastante satisfactorio en cuanto a superposición.

❖ Análisis global y comentarios:

En este caso, la posición inicial del mecanismo se sitúa en la mitad de la carrera de bajada del brazo mecánico. En el movimiento global se distinguen, como en el estudio anterior, tres fases bien diferenciadas (ilustración 48).

La primera de las fases comienza con un ascenso rápido de la velocidad hasta su valor pico. Se podría enmarcar este suceso entre los segundos 6 y 10, por lo que su duración abarca 4 segundos aproximadamente. Analizando la curva de aceleración se observa que la curva comienza a crecer progresivamente desde antes de que se produzca el comienzo del movimiento de elevación. Esto es lógico porque, tal y como se ha comentado anteriormente el mecanismo viene de un movimiento de descenso y tiene que cambiar su tendencia. La curva de aceleración desciende al alcanzar su punto máximo, aproximadamente en la mitad de la fase.

La segunda fase se desarrolla a partir del segundo 10 y dura unos 7 segundos. Se observa que tras alcanzar la velocidad máxima, ésta cambia radicalmente su tendencia y desciende de forma brusca suavizando su descenso en el segundo 14, instante en el que se alcanza el punto más alto de la trayectoria del brazo. La aceleración muestra un ligero tramo en donde prácticamente se mantiene constante para, posteriormente, descender considerablemente hasta situarse en valores cercanos a 0.

Por último, la tercera fase presenta un movimiento muy suavizado. La velocidad aumenta un poco para realizar el movimiento de descenso del brazo y reduce su valor para aproximarse al punto inferior de la trayectoria. La aceleración, sin embargo permanece prácticamente constante y en valores bajos cercanos a 0.

Este movimiento, comparado con el anterior es de las mismas características, salvo el tramo de descenso que presenta una curva más suavizada. La duración del ciclo es exactamente la misma, 36 segundos. Se puede considerar que el recorrido en el eje X es mayor en este caso (350mm frente a los 250mm del primer mecanismo), siendo el del eje Y prácticamente del mismo orden (400mm)

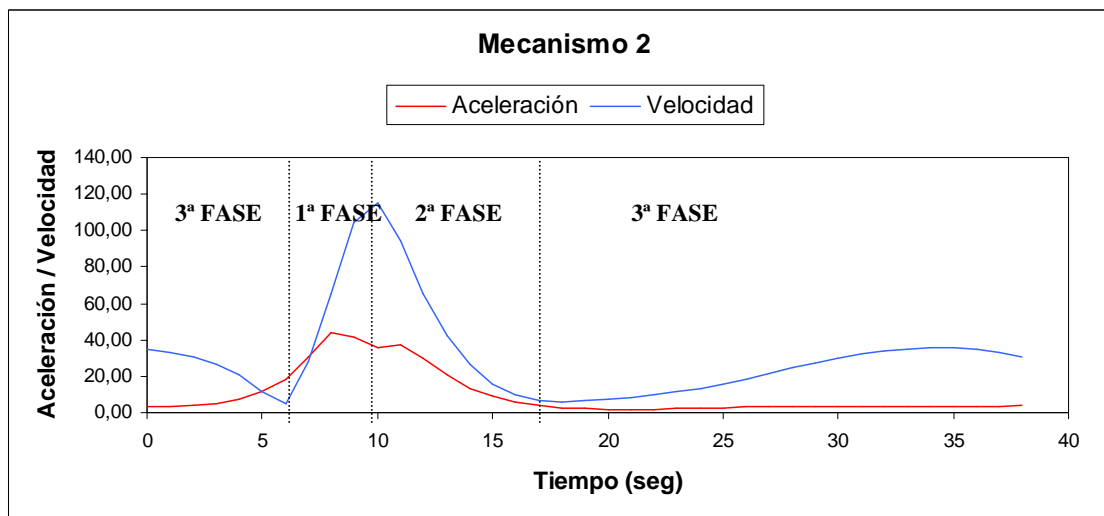


Ilustración 48. Fases del movimiento del Mecanismo 2.

7.3 Análisis cinemático del Mecanismo 3.

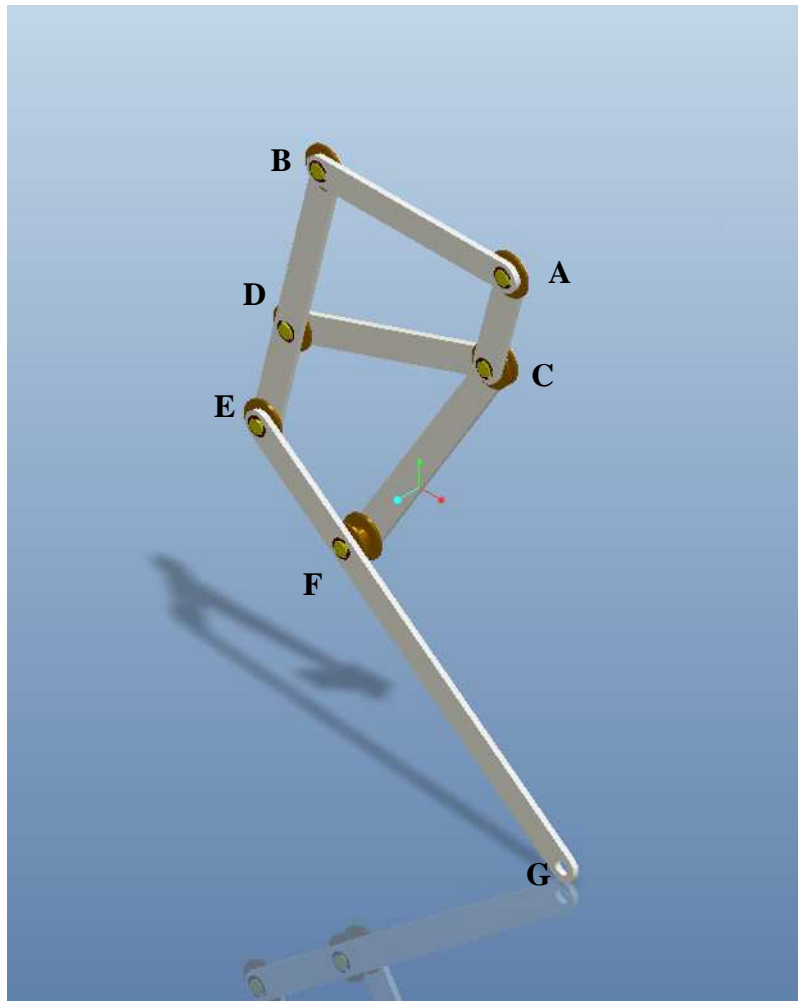


Ilustración 49. Mecanismo 3

La ilustración 49 refleja una captura del ensamblaje del mecanismo 3. Como viene siendo habitual, antes de presentar los datos y comentarios del análisis se realizará un recordatorio de las características principales del mecanismo.

- **Nº ESLABONES:** 6 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 7 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 0 pares
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón AB (horizontal)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)

❖ **Velocidad:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)			Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)	
0	19,655	0	0,00	20	40,408	40,417	0,13
1	19,705	19,713	0,17	21	41,285	41,289	0,06
2	19,372	19,377	0,11	22	40,974	40,974	0,00
3	19,199	19,200	0,03	23	39,456	39,452	0,07
4	20,886	20,905	0,42	24	36,846	36,839	0,11
5	27,468	27,477	0,18	25	33,411	33,403	0,15
6	40,838	40,846	0,13	26	29,546	29,563	0,30
7	58,021	58,064	0,56	27	25,686	25,709	0,46
8	69,533	69,610	0,93	28	22,223	22,251	0,60
9	67,232	67,278	0,57	29	19,465	19,496	0,71
10	54,502	54,475	0,37	30	17,625	17,655	0,72
11	39,370	39,327	0,69	31	16,783	16,809	0,63
12	27,043	27,014	0,56	32	16,828	16,847	0,46
13	20,211	20,201	0,22	33	17,471	17,481	0,24
14	19,710	19,715	0,11	34	18,355	18,358	0,07
15	23,087	23,097	0,20	35	19,162	19,174	0,28
16	27,539	27,548	0,17	36	19,655	19,666	0,25
17	31,835	31,861	0,45	37	19,705	19,713	0,17
18	35,539	35,559	0,33	38	19,372	19,377	0,11
19	38,447	38,462	0,24	39	19,199	19,200	0,03

Tabla 7.7. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo3.

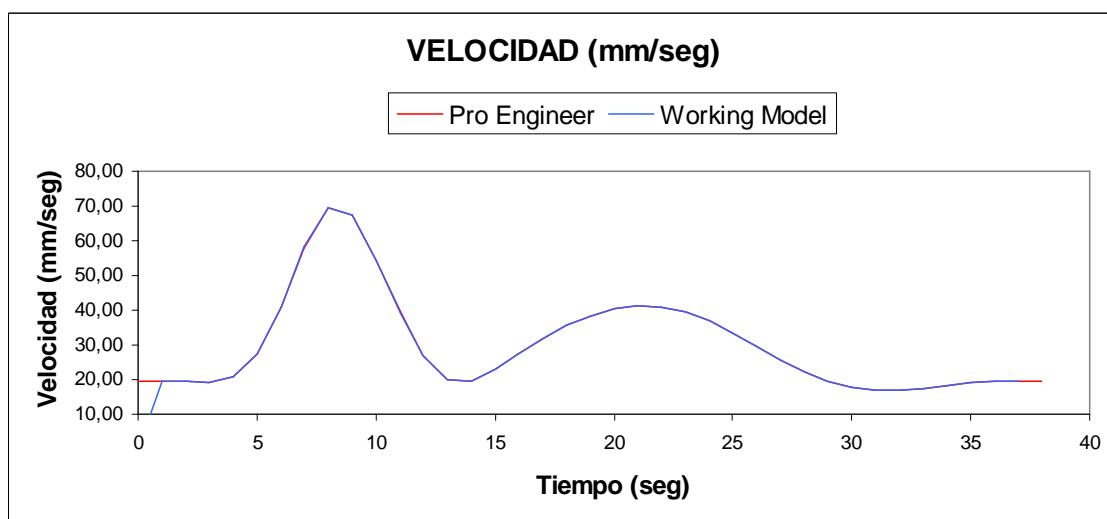


Ilustración 50. Gráfico de velocidad del Mecanismo3.

Los valores de error se mantienen muy homogéneos en el presente análisis y en todos los casos por debajo del valor 1% (tabla 7.7). Se demuestra nuevamente que ambos programas arrojan datos más que aproximados. El valor numérico del error cometido cambiando de un programa a otro es del 0,3%. Las gráficas son idénticas como se puede observar en la ilustración 50.

❖ **Aceleración:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)			Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)	
0	2,905	0	0,00	20	6,039	6,038	0,03
1	3,398	3,398	0,01	21	5,473	5,473	0,01
2	4,468	4,471	0,14	22	4,950	4,951	0,04
3	6,294	6,299	0,20	23	4,610	4,612	0,09
4	9,133	9,146	0,43	24	4,518	4,521	0,13
5	13,122	13,132	0,28	25	4,554	4,556	0,09
6	17,067	17,079	0,28	26	4,514	4,510	0,19
7	16,487	16,491	0,10	27	4,299	4,297	0,10
8	9,425	9,438	0,41	28	3,968	3,968	0,00
9	11,018	11,057	1,16	29	3,657	3,659	0,09
10	15,141	15,167	0,68	30	3,455	3,458	0,16
11	15,328	15,334	0,16	31	3,341	3,344	0,16
12	13,782	13,782	0,00	32	3,239	3,242	0,16
13	11,959	11,957	0,05	33	3,099	3,102	0,16
14	10,369	10,365	0,11	34	2,931	2,935	0,21
15	9,133	9,129	0,12	35	2,816	2,813	0,15
16	8,228	8,224	0,16	36	2,905	2,904	0,08
17	7,571	7,567	0,16	37	3,398	3,398	0,01
18	7,052	7,049	0,10	38	4,468	4,471	0,14
19	6,564	6,562	0,07	39	6,294	6,299	0,20

Tabla 7.8. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo3.

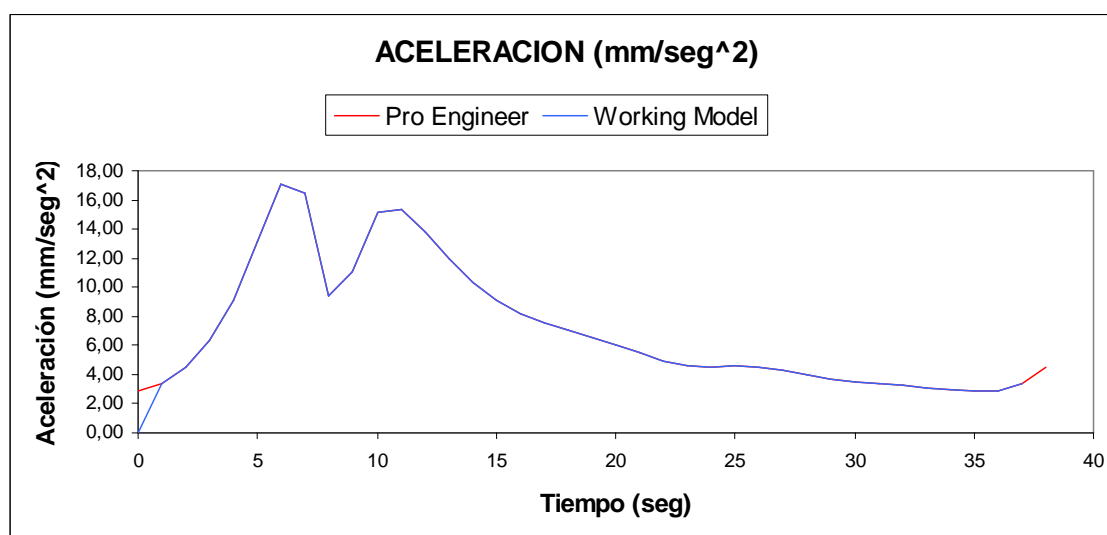


Ilustración 51. Gráfico de aceleración del Mecanismo3.

Los valores de aceleración mostrados en la tabla 7.8 presentan menor dispersión que en el caso de velocidad, siendo en la inmensa mayoría menores al 1% de error. El error promedio cometido en este caso cambiando de un programa a otro es del 0,17%, que es un error prácticamente nulo y que se refleja en la gráfica de la ilustración 51, pudiéndose ver claramente que la superposición en las gráficas es total.

❖ Trayectoria:

T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)		T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y		X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y
0	122,47	-391,17	122,67	-391,07	0,164	0,027	20	401,09	-165,91	401,25	-165,52	0,041	0,235
1	108,35	-377,43	108,54	-377,33	0,171	0,026	21	392,08	-205,82	392,29	-205,45	0,053	0,181
2	96,94	-361,58	97,11	-361,49	0,174	0,026	22	377,81	-244,47	378,05	-244,11	0,065	0,144
3	89,64	-343,86	89,79	-343,78	0,170	0,026	23	359,48	-280,35	359,76	-280,01	0,079	0,119
4	88,43	-324,24	88,58	-324,15	0,163	0,028	24	338,66	-312,39	338,98	-312,08	0,093	0,101
5	96,10	-301,99	96,22	-301,90	0,126	0,028	25	316,94	-340,05	317,28	-339,75	0,109	0,088
6	116,02	-274,88	116,06	-274,84	0,038	0,015	26	295,59	-363,20	295,96	-362,92	0,124	0,078
7	149,58	-238,86	149,76	-238,66	0,118	0,082	27	275,40	-382,00	275,77	-381,75	0,132	0,066
8	192,12	-190,09	192,29	-189,82	0,087	0,141	28	256,60	-396,75	256,95	-396,52	0,138	0,057
9	232,10	-133,17	232,25	-132,85	0,064	0,244	29	238,96	-407,71	239,30	-407,50	0,140	0,050
10	262,65	-80,20	262,83	-79,63	0,070	0,719	30	222,05	-415,08	222,37	-414,89	0,141	0,044
11	285,88	-39,52	286,00	-38,95	0,042	1,459	31	205,41	-419,00	205,70	-418,83	0,141	0,040
12	305,96	-13,57	306,02	-13,06	0,020	3,862	32	188,70	-419,57	188,97	-419,42	0,143	0,036
13	325,35	-1,38	325,38	-0,91	0,009	50,846	33	171,82	-416,92	172,07	-416,78	0,147	0,033
14	344,59	-1,18	344,61	-0,74	0,004	60,181	34	154,88	-411,17	155,12	-411,05	0,157	0,031
15	363,03	-11,35	363,05	-10,92	0,004	3,993	35	138,24	-402,51	138,48	-402,39	0,171	0,030
16	379,48	-30,45	379,51	-30,01	0,007	1,451	36	122,47	-391,17	122,69	-391,05	0,180	0,031
17	392,60	-57,05	392,65	-56,62	0,012	0,766	37	108,35	-377,43	108,56	-377,31	0,189	0,031
18	401,13	-89,65	401,22	-89,24	0,021	0,470	38	96,94	-361,58	97,11	-361,49	0,194	0,031
19	404,13	-126,56	404,25	-126,15	0,030	0,321	39	89,64	-343,86	89,79	-343,78	0,041	0,235

Tabla 7.9. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo3.

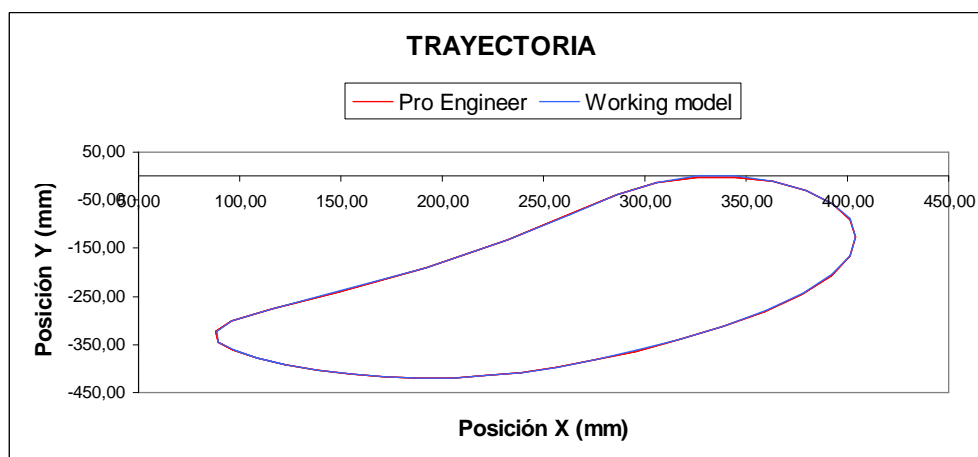


Ilustración 52. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo3.

En el presente análisis (tabla 7.9) se aprecian valores altos en los instantes 13 y 14, en donde el error en la medida Y es de más del 50%. Se puede observar en la gráfica (ilustración 52) que, cerca de la línea de abscisas, aproximadamente a 325mm en el eje X existe una pequeña desviación de los datos que no altera significativamente la trayectoria completa que realiza el extremo del brazo. En el resto de puntos el error se mantiene en valores normales, siendo el promedio de error de 0,101% en el eje X y de 3,23% en el eje Y. Es evidente que los errores atípicos antes mencionados hacen que el error en Y no refleje fielmente la realidad, ya que la gráfica muestra una superposición casi perfecta si excluimos los datos antes mencionados.

❖ Análisis global y comentarios:

Este mecanismo comienza su trayectoria en el punto más bajo del recorrido. Al contrario que los anteriores, este mecanismo efectúa su movimiento de derecha a izquierda, es decir, bajando por la zona que queda a la derecha del centro de la elipse y subiendo por la de la izquierda. Se presenta a continuación una descripción de las fases del movimiento que se observan en la ilustración 53.

La primera fase, como en el resto de casos, comienza con un ascenso rápido de la velocidad hasta su valor pico. Este suceso abarca aproximadamente los 7 primeros segundos. La curva de aceleración sigue la tendencia de los anteriores mecanismos, creciendo progresivamente desde antes de que se produzca el comienzo del movimiento de elevación. Tras ello, la curva de aceleración desciende al alcanzar su punto máximo, aproximadamente en la mitad de la fase, en donde la velocidad está creciendo de forma brusca y empieza a cambiar su tendencia.

La segunda fase se caracteriza por un descenso brusco de la velocidad y dura unos 7 segundos más. Aunque en el instante 14, que marca el final de la fase, el brazo no está en su máxima altura sí que se percibe que el movimiento de ascenso está próximo a su final. Por ello se nota un pronunciado cambio de tendencia en el que prácticamente no existe transición. Este efecto es debido a que el brazo avanza en el sentido positivo del eje X mientras que en el eje Y crece de forma bastante más controlada. La aceleración muestra la misma tendencia que en el caso anterior, esto es un ascenso hasta llegar a su punto máximo en la mitad de fase y comienza a bajar hasta el final de fase.

Por último, la tercera fase presenta una curva similar a las dos fases anteriores pero de forma más controlada. La velocidad aumenta progresivamente para realizar el movimiento de descenso del brazo y reduce su valor para aproximarse al punto inferior de la trayectoria. La aceleración en esta fase muestra un descenso progresivo hasta llegar a valores cercanos a 0.

Este movimiento, comparado con los anteriores presenta un eje menor de elipse de mayor tamaño. Es decir el movimiento de bajada no está tan próximo al de subida como en los casos anteriores. La duración del ciclo, como viene siendo común, es de 36 segundos. El recorrido en el eje X se sitúa entre los anteriores mecanismos con un valor de aproximadamente 300mm. El eje Y se consigue un recorrido ligeramente mayor que en los casos anteriores, siendo de 450mm en el caso que nos ocupa.

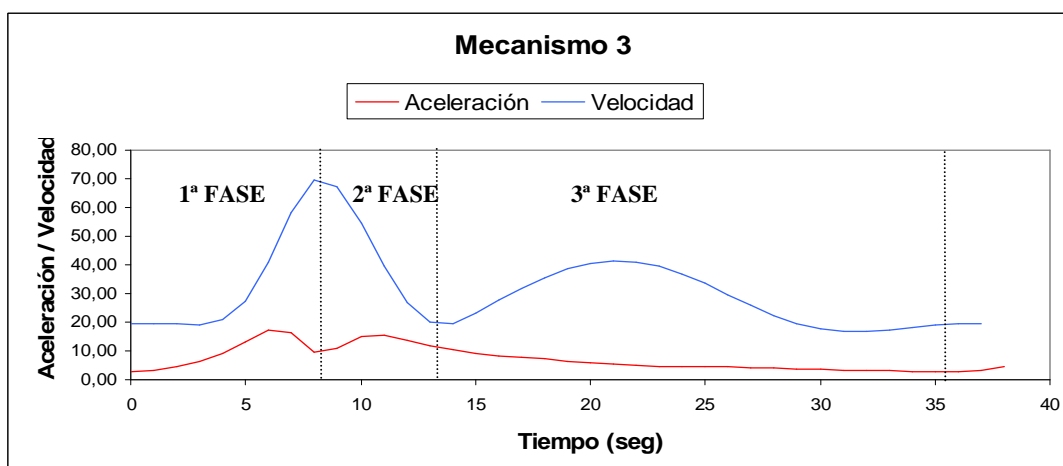


Ilustración 53. Fases del movimiento en el Mecanismo3.

7.4 Análisis cinemático del Mecanismo 4.

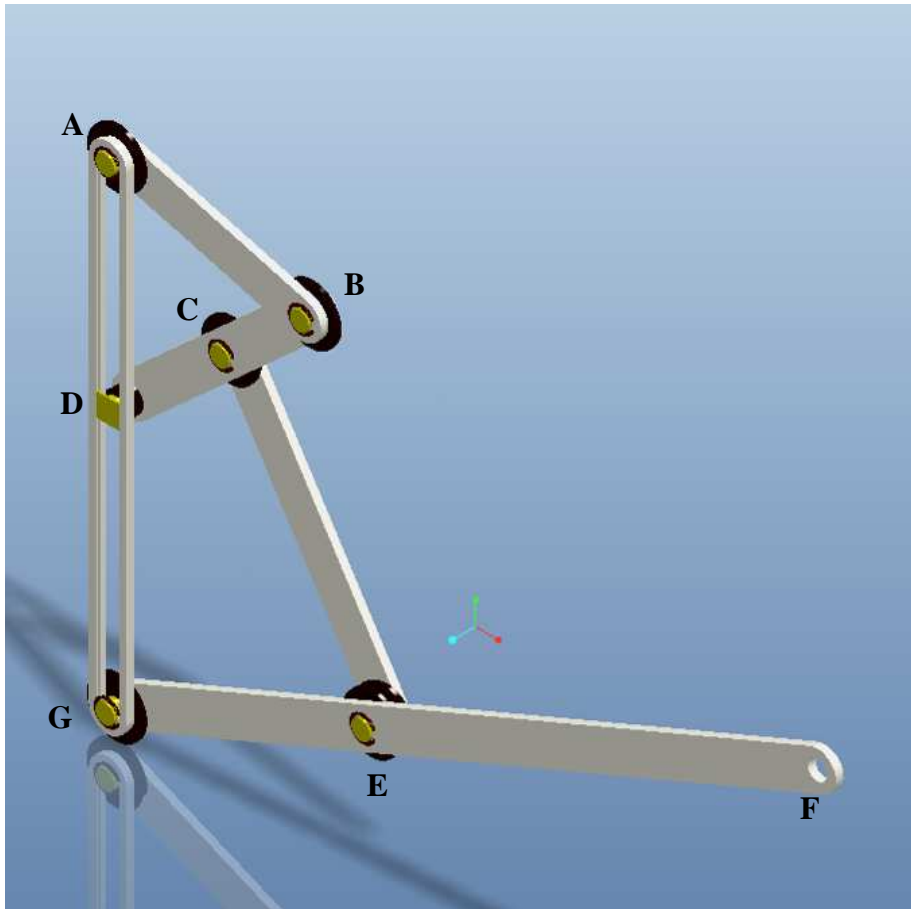


Ilustración 54. Mecanismo 4,

La captura del ensamblaje del mecanismo 4 se puede ver en la ilustración 54. Se presentan las características principales de éste mecanismo y posteriormente se muestran los datos y comentarios del análisis.

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 pares
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón ADG (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)

❖ **Velocidad:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)			Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)	
0	43,787	0	-	20	20,268	20,267	0,02
1	40,822	40,816	0,09	21	17,585	17,582	0,08
2	35,372	35,375	0,05	22	14,548	14,543	0,14
3	26,993	26,997	0,08	23	10,432	10,426	0,19
4	15,138	15,133	0,13	24	3,958	3,957	0,06
5	0,416	0,398	2,91	25	6,146	6,138	0,30
6	18,345	18,323	0,52	26	18,306	18,319	0,30
7	34,904	34,889	0,25	27	28,088	28,106	0,33
8	45,217	45,217	0,01	28	33,966	33,967	0,02
9	47,466	47,465	0,01	29	37,193	37,189	0,06
10	44,350	44,342	0,12	30	39,083	39,080	0,05
11	39,800	39,793	0,11	31	40,427	40,424	0,04
12	36,137	36,135	0,04	32	41,668	41,666	0,02
13	33,901	33,902	0,02	33	42,983	42,982	0,01
14	32,675	32,677	0,03	34	44,194	44,195	0,02
15	31,717	31,718	0,02	35	44,713	44,716	0,04
16	30,349	30,350	0,02	36	43,785	43,788	0,04
17	28,275	28,278	0,06	37	40,822	40,816	0,09
18	25,683	25,686	0,05	38	35,372	35,375	0,05
19	22,945	22,945	0,00	39	26,993	26,997	0,08

Tabla 7.10. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo4.

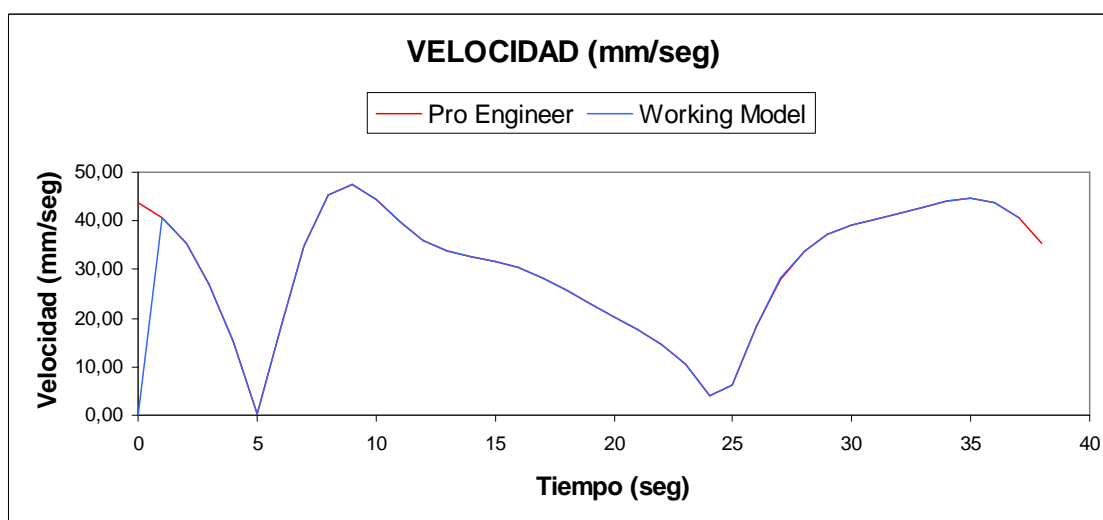


Ilustración 55. Gráfico de velocidad del Mecanismo4.

En el análisis mostrado en la tabla 7.10 se encuentran los errores típicos que vienen siendo habituales en el resto de análisis y que, por lo general, no superan el valor de 1%. El valor numérico del error cometido cambiando de un programa a otro es del 0,16%. Se puede observar que las gráficas proporcionadas por ambos programas son idénticas (ilustración 55).

❖ **Aceleración:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)			Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)	
0	5,146	0	-	20	2,839	2,840	0,06
1	5,870	5,871	0,02	21	2,882	2,883	0,04
2	7,503	7,503	0,01	22	3,455	3,457	0,11
3	10,200	10,200	0,01	23	5,039	5,040	0,05
4	13,756	13,755	0,03	24	8,173	8,173	0,00
5	17,131	17,130	0,02	25	11,788	11,799	0,31
6	18,092	18,096	0,10	26	11,649	11,675	0,75
7	14,468	14,478	0,27	27	7,958	7,962	0,14
8	7,999	8,005	0,22	28	5,159	5,159	0,00
9	5,746	5,746	0,01	29	4,201	4,202	0,03
10	6,598	6,597	0,04	30	4,110	4,110	0,00
11	5,858	5,857	0,05	31	4,270	4,269	0,03
12	4,386	4,385	0,05	32	4,523	4,523	0,02
13	3,297	3,297	0,00	33	4,806	4,806	0,01
14	2,837	2,838	0,06	34	4,982	4,983	0,03
15	2,734	2,735	0,04	35	4,999	5,000	0,05
16	2,872	2,871	0,06	36	5,146	5,146	0,02
17	3,117	3,118	0,06	37	5,870	5,871	0,02
18	3,182	3,183	0,05	38	7,503	7,503	0,01
19	3,022	3,023	0,05	39	10,200	10,200	0,01

Tabla 7.11. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo4.

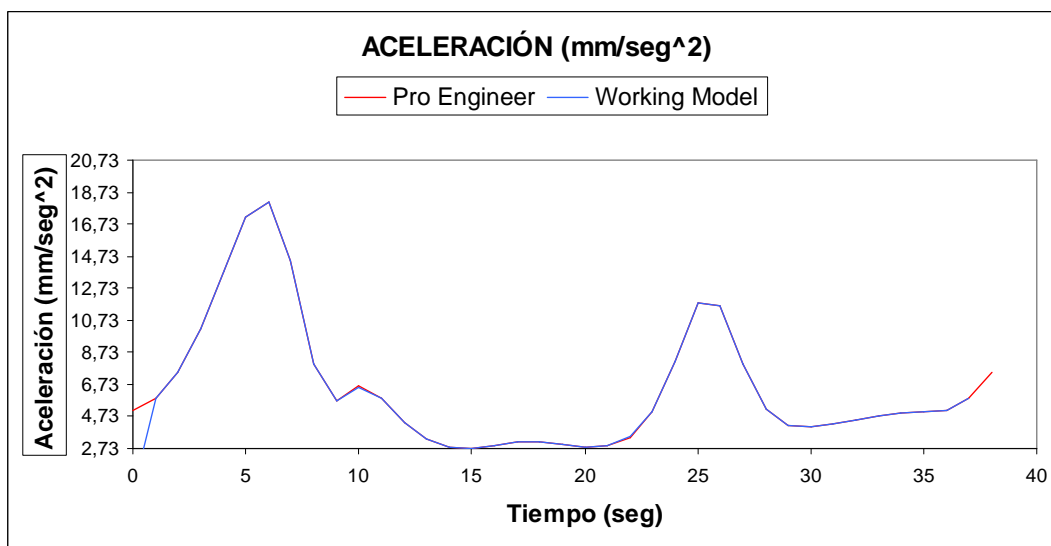


Ilustración 56. Gráfico de aceleración del Mecanismo4.

Se vuelven a tener 2 gráficas idénticas (ilustración 56) en las que la dispersión de los datos es bastante homogénea, presentando valores de error no superiores al 0,75%. El error promedio cometido en este caso cambiando de un programa a otro es del 0,07%, que es un error prácticamente nulo. Pueden verse los datos del análisis en la tabla 7.11.

❖ Trayectoria:

T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)		T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y		X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y
0	368,78	29,92	368,79	29,90	0,003	0,086	20	124,72	255,06	124,74	255,05	0,012	0,002
1	383,16	-10,16	383,14	-10,08	0,006	0,803	21	106,59	260,54	106,61	260,53	0,024	0,002
2	392,37	-47,22	392,37	-47,25	0,002	0,067	22	90,97	264,52	91,00	264,51	0,035	0,003
3	397,26	-78,28	397,27	-78,32	0,001	0,046	23	78,63	267,19	78,67	267,19	0,044	0,002
4	399,20	-99,70	399,19	-99,60	0,002	0,099	24	71,33	268,59	71,35	268,59	0,019	0,001
5	399,60	-107,12	399,61	-107,24	0,001	0,111	25	72,19	268,43	72,12	268,45	0,104	0,005
6	399,07	-97,81	399,09	-97,98	0,003	0,173	26	84,30	266,02	84,12	266,06	0,215	0,015
7	396,34	-71,00	396,37	-71,19	0,007	0,261	27	107,08	260,40	106,98	260,43	0,095	0,011
8	388,82	-31,07	388,84	-31,18	0,007	0,349	28	136,81	250,88	136,81	250,88	0,003	0,001
9	375,18	13,70	375,18	13,71	0,001	0,092	29	169,77	237,18	169,80	237,17	0,014	0,004
10	356,74	55,93	356,71	56,00	0,010	0,124	30	203,54	219,34	203,56	219,33	0,012	0,006
11	335,78	92,38	335,74	92,44	0,011	0,063	31	236,72	197,43	236,74	197,42	0,008	0,007
12	313,72	123,16	313,70	123,19	0,007	0,022	32	268,51	171,49	268,52	171,48	0,004	0,005
13	290,88	149,57	290,87	149,58	0,004	0,009	33	298,32	141,46	298,33	141,46	0,001	0,001
14	267,06	172,79	267,08	172,78	0,009	0,011	34	325,56	107,41	325,55	107,42	0,002	0,008
15	242,24	193,31	242,26	193,29	0,009	0,008	35	349,37	69,78	349,36	69,80	0,002	0,021
16	216,78	211,16	216,82	211,14	0,015	0,010	36	368,80	29,88	368,79	29,90	0,002	0,058
17	191,57	226,14	191,57	226,14	0,003	0,001	37	383,16	-10,16	383,14	-10,08	0,006	0,795
18	167,45	238,26	167,45	238,27	0,002	0,001	38	392,37	-47,22	392,37	-47,25	0,002	0,067
19	145,06	247,77	145,07	247,77	0,003	0,000	39	397,26	-78,28	397,27	-78,32	0,001	0,046

Tabla 7.12. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo4.

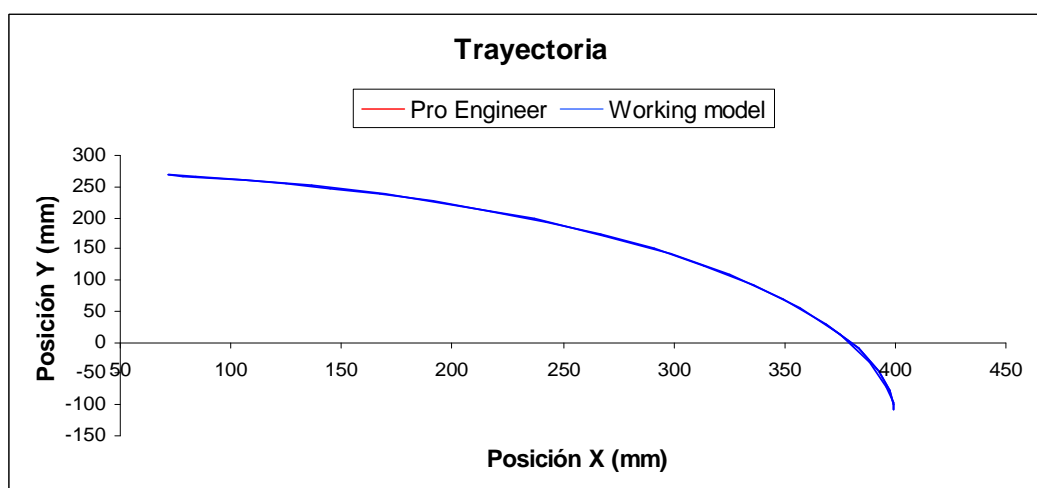


Ilustración 57. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo4.

Aunque de nuevo se observa que el análisis de trayectoria presenta una mayor desviación en a comparación de datos, en el presente análisis se pueden ver errores relativamente altos. El error para este mecanismo se sitúa en valores de 2.45% para los datos de posición en X y del 3.6% para los de Y (tabla 7.12). Este error, que parece alto si lo comparamos con otros errores, no refleja fielmente la realidad puesto que si se analiza la gráfica de la ilustración 57, no se distingue diferencia alguna entre la trayectoria generada mediante un programa u otro.

❖ **Análisis global y comentarios:**

En el presente estudio, la trayectoria en el instante inicial se encuentra aproximándose al punto inferior de la trayectoria. Una particularidad del movimiento del mecanismo 4 es que efectúa el mismo trayecto en la fase de ascenso que en la de descenso (ver ilustración 57). Por tanto se genera una línea más o menos curva en lugar de una trayectoria elíptica.

Se puede distinguir una 1ª fase en la que el brazo está acercándose al punto en donde la trayectoria pasa de ser descendente a ser ascendente. Es lógico entonces que la velocidad disminuya bruscamente hasta un valor muy próximo a 0, a la vez que la aceleración comienza su curva de ascenso y se acerca a un máximo. La duración de esta fase es de 5 segundos.

La segunda fase se caracteriza por un aumento brusco de la velocidad que dura unos 4 segundos más mientras se observa un descenso relativamente brusco de la aceleración. Traducido al comportamiento del brazo, se puede decir que éste comienza su trayectoria ascendente con una alta velocidad, siendo reducida aproximadamente en la mitad inferior del recorrido ascendente.

En la tercera fase la velocidad comienza a disminuir de manera progresiva y controlada, al tiempo que la aceleración se estabiliza en un valor constante con una tendencia ligeramente descendente. Es la fase con más duración en la trayectoria y completa los 15 segundos siguientes.

Del segundo 24 al 36, el brazo ha alcanzado su punto más alto y de nuevo se observa el cambio de tendencia ascendente a descendente al comenzar la cuarta y última fase (que se solapa con la primera). Al comenzar el descenso, la velocidad que alcanza el brazo asciende de forma brusca y comienza a estabilizarse para encarar el comienzo de la primera fase, en donde el brazo se sitúa en el punto inferior. La aceleración comienza a aumentar en los instantes finales de la fase anterior, alcanzando su máximo en los instantes iniciales de la siguiente fase y disminuyendo para mantenerse constante una vez controlado el movimiento del brazo y su velocidad. Todo ello puede verse gráficamente en la ilustración 58.

El recorrido en el eje X se encuentra dentro del rango habitual con aproximadamente una longitud de 350mm mientras que el eje Y se posiciona en un valor algo más bajo de lo habitual, siendo de 350mm para este caso. Por tanto se describe un movimiento muy similar en cuanto alcance para los ejes X e Y.

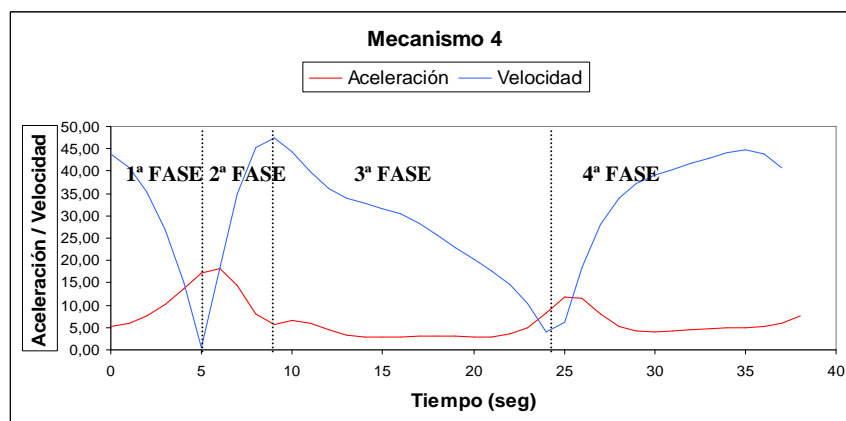


Ilustración 58. Fases del movimiento para Mecanismo 4.

7.5 Análisis cinemático del Mecanismo 5.

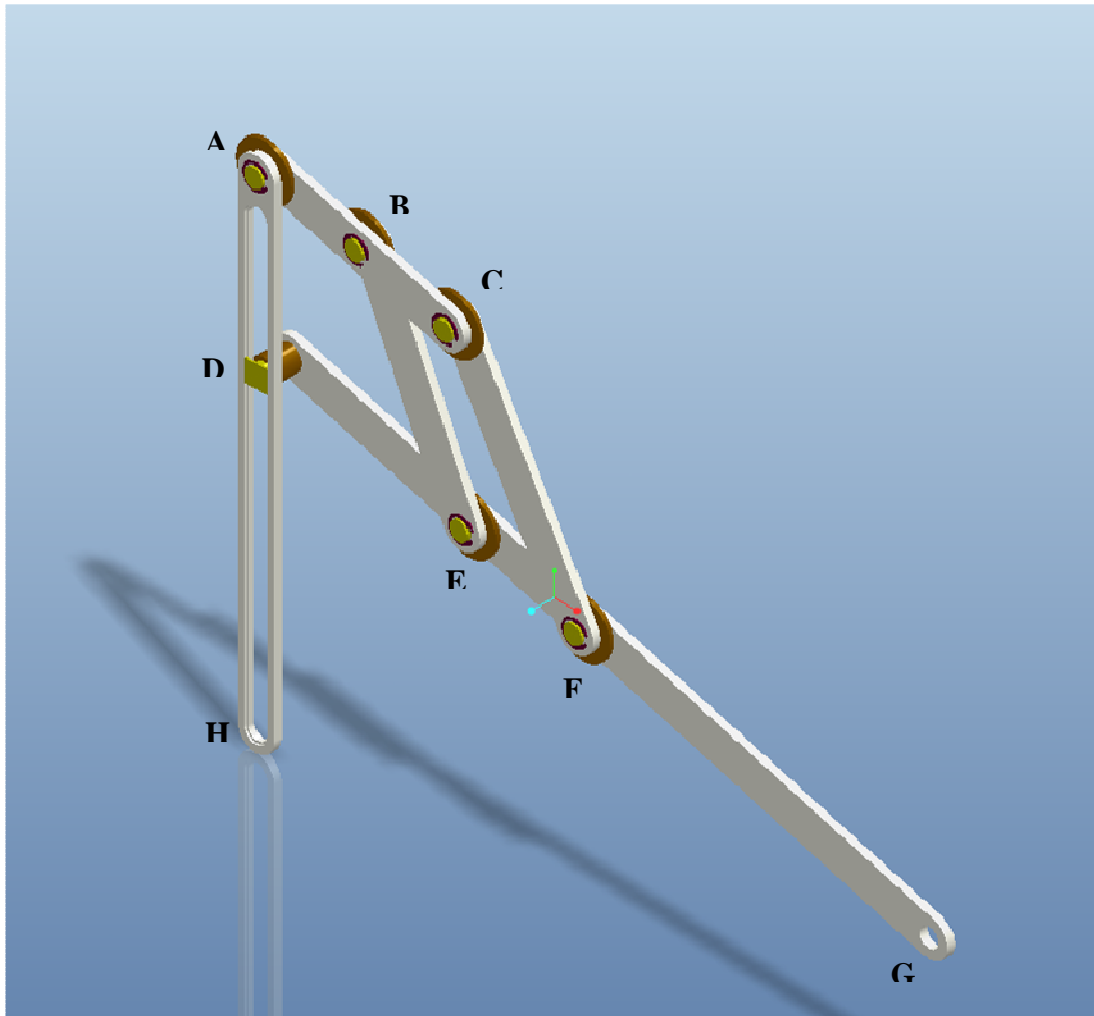


Ilustración 59. Mecanismo 5.

La ilustración 59 representa una captura del ensamblaje del mecanismo 5. Para la mejor comprensión del análisis posterior se recordarán las características básicas de este mecanismo a continuación:

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 pares
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón ADH (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)

❖ **Velocidad:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)			Velocidad (mm/seg)	Velocidad (mm/seg)	
0	46,241	0	-	20	10,568	10,570	0,016
1	45,428	45,441	0,029	21	14,025	14,028	0,022
2	42,566	42,585	0,04	22	17,816	17,819	0,019
3	33,365	33,385	0,061	23	21,759	21,763	0,019
4	28,345	28,190	0,549	24	25,735	25,740	0,019
5	109,539	109,517	0,020	25	29,604	29,610	0,020
6	63,576	63,578	0,003	26	33,194	33,200	0,017
7	52,306	52,308	0,003	27	36,337	36,343	0,017
8	46,623	46,623	0,000	28	38,920	38,926	0,016
9	42,231	42,232	0,003	29	40,922	40,928	0,014
10	38,046	38,048	0,006	30	42,416	42,422	0,014
11	33,776	33,778	0,006	31	43,529	43,534	0,012
12	29,385	29,386	0,003	32	44,399	44,405	0,014
13	24,923	24,924	0,005	33	45,130	45,136	0,014
14	20,475	20,475	0,001	34	45,752	45,760	0,017
15	16,157	16,157	0,001	35	46,195	46,203	0,018
16	12,152	12,152	0,004	36	46,244	46,255	0,024
17	8,848	8,848	0,005	37	45,428	45,441	0,029
18	7,127	7,127	0,001	38	42,566	42,585	0,045
19	7,915	7,916	0,013	39	33,365	33,385	0,061

Tabla 7.13. Resultados de velocidad frente a tiempo para el Mecanismo5.

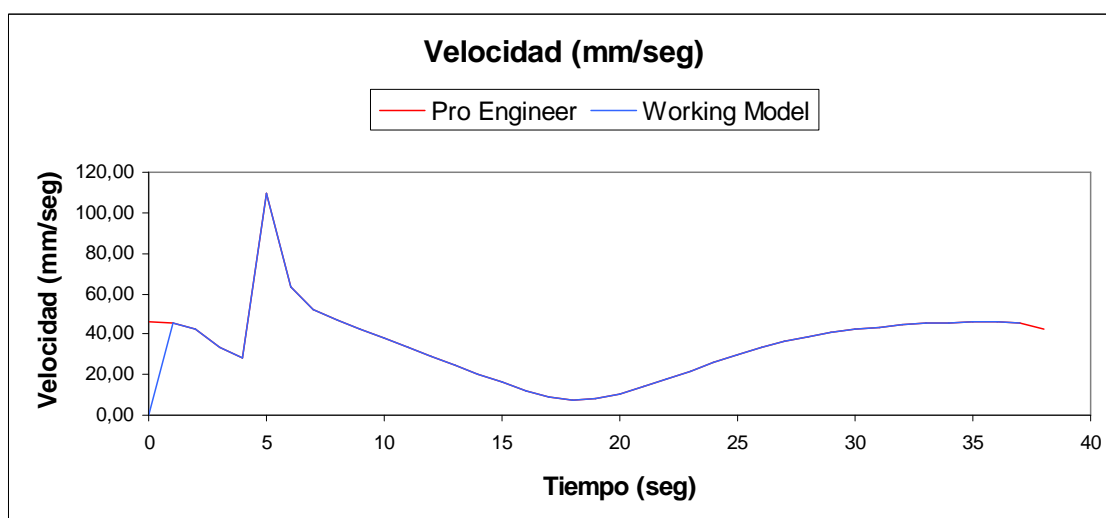


Ilustración 60. Gráfico de velocidad del Mecanismo5.

El estudio cinemático del mecanismo 5 presenta errores en los datos de velocidad generalmente inferiores al 1% (tabla 7.13). El máximo error que encontramos se acerca al 0,5%. En todo caso, el error promedio cometido cambiando de un programa a otro es del 0.03%, que es prácticamente nulo. Existe una gran similitud entre las gráficas que arrojan ambos programas (ver ilustración 60).

❖ **Aceleración:**

Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)	Tiempo (seg)	Pro-E	WM	Error (%)
	Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)			Aceleración (mm/seg ²)	Aceleración (mm/seg ²)	
0	7,026	0	-	20	4,577	4,578	0,013
1	6,638	6,640	0,029	21	4,618	4,619	0,025
2	7,132	7,130	0,02	22	4,702	4,702	0,009
3	16,981	16,966	0,088	23	4,809	4,810	0,023
4	219,726	219,195	0,242	24	4,908	4,909	0,017
5	131,192	131,126	0,050	25	4,979	4,979	0,010
6	27,330	27,326	0,015	26	5,040	5,041	0,020
7	12,515	12,513	0,012	27	5,160	5,161	0,026
8	7,447	7,444	0,038	28	5,406	5,407	0,020
9	5,322	5,322	0,006	29	5,788	5,789	0,023
10	4,537	4,537	0,006	30	6,246	6,247	0,017
11	4,376	4,376	0,011	31	6,696	6,698	0,026
12	4,444	4,445	0,014	32	7,067	7,068	0,021
13	4,559	4,559	0,001	33	7,308	7,310	0,022
14	4,649	4,649	0,010	34	7,393	7,395	0,025
15	4,693	4,693	0,007	35	7,303	7,305	0,031
16	4,693	4,693	0,008	36	7,027	7,029	0,032
17	4,661	4,661	0,005	37	6,638	6,640	0,029
18	4,616	4,617	0,017	38	7,132	7,130	0,023
19	4,581	4,582	0,014	39	16,981	16,966	0,088

Tabla 7.14. Resultados de aceleración frente a tiempo para el Mecanismo5.

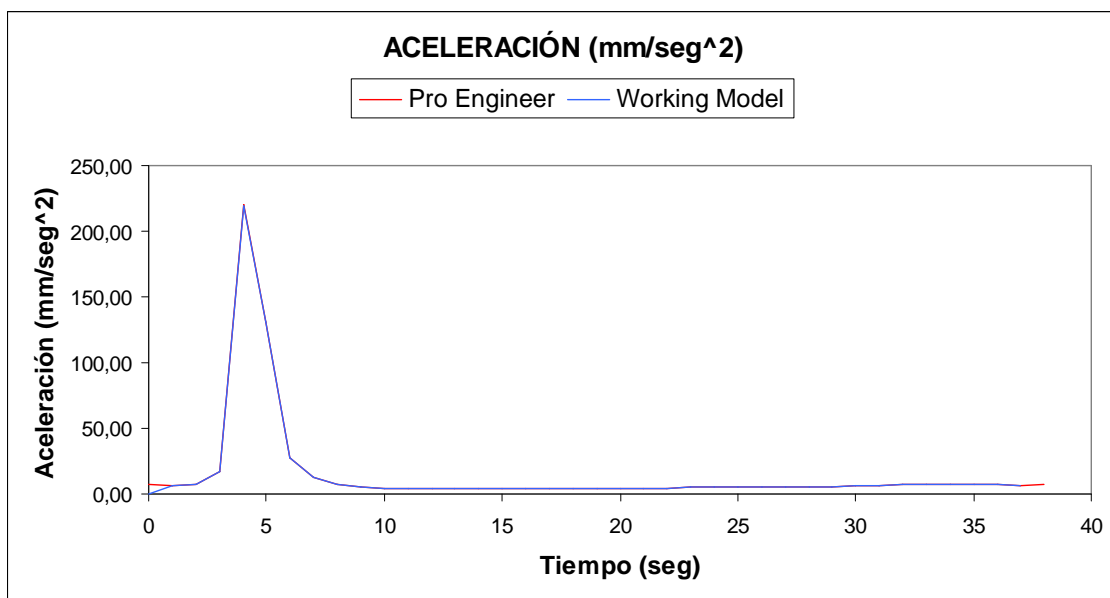


Ilustración 61. Gráfico de aceleración del Mecanismo 5.

Para los datos de aceleración (tabla 7.14) obtenidos en este caso, se tienen datos muy aproximados. Los errores que se encuentran están por debajo del 0,24% y se obtiene un error relativo medio del 0,027%. Se deduce que los datos son independientes del programa que utilizemos. Como ya es de esperar, las dos gráficas de la ilustración 61 se superponen de manera perfecta.

❖ Trayectoria:

T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)		T (seg)	Pro-E		WM		Error (%)	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y		X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y
0	346,60	-61,09	346,61	-61,13	0,004	0,074	20	58,53	307,04	58,50	307,07	0,036	0,010
1	329,74	-103,80	329,75	-103,83	0,004	0,029	21	70,09	310,99	70,08	311,03	0,027	0,010
2	307,87	-142,24	307,87	-142,28	0,000	0,029	22	85,85	313,00	85,84	313,03	0,019	0,010
3	284,66	-173,48	284,66	-173,52	0,000	0,022	23	105,61	312,55	105,60	312,58	0,013	0,010
4	275,50	-185,40	275,44	-185,50	0,025	0,053	24	129,09	309,06	129,08	309,09	0,007	0,011
5	359,07	15,21	359,09	15,28	0,007	0,456	25	155,82	301,92	155,82	301,95	0,003	0,011
6	334,18	90,30	334,20	90,34	0,006	0,039	26	185,10	290,52	185,10	290,55	0,001	0,012
7	298,96	134,99	298,96	135,04	0,001	0,037	27	215,89	274,34	215,90	274,37	0,004	0,012
8	261,36	166,72	261,34	166,78	0,007	0,034	28	246,93	253,02	246,95	253,05	0,007	0,012
9	224,11	190,84	224,10	190,89	0,006	0,025	29	276,76	226,46	276,78	226,49	0,009	0,011
10	188,82	209,94	188,80	209,99	0,010	0,021	30	303,87	194,82	303,90	194,84	0,010	0,011
11	156,49	225,60	156,47	225,64	0,013	0,019	31	326,85	158,52	326,88	158,54	0,010	0,009
12	127,81	238,84	127,79	238,88	0,017	0,016	32	344,46	118,27	344,50	118,28	0,010	0,007
13	103,24	250,41	103,22	250,45	0,022	0,015	33	355,73	74,99	355,76	74,99	0,010	0,003
14	83,07	260,81	83,04	260,85	0,029	0,013	34	359,98	29,79	360,01	29,78	0,009	0,018
15	67,46	270,36	67,44	270,39	0,037	0,012	35	356,89	-16,05	356,92	-16,07	0,008	0,082
16	56,50	279,22	56,47	279,25	0,044	0,012	36	346,59	-61,11	346,62	-61,13	0,007	0,036
17	50,18	287,44	50,15	287,47	0,049	0,011	37	329,74	-103,80	329,75	-103,83	0,004	0,029
18	48,46	294,96	48,44	294,99	0,048	0,010	38	307,87	-142,24	307,87	-142,28	0,000	0,029
19	51,28	301,58	51,26	301,61	0,043	0,010	39	284,66	-173,48	284,66	-173,52	0,000	0,022

Tabla 7.15. Resultados de trayectoria (X frente a Y) para el Mecanismo5.

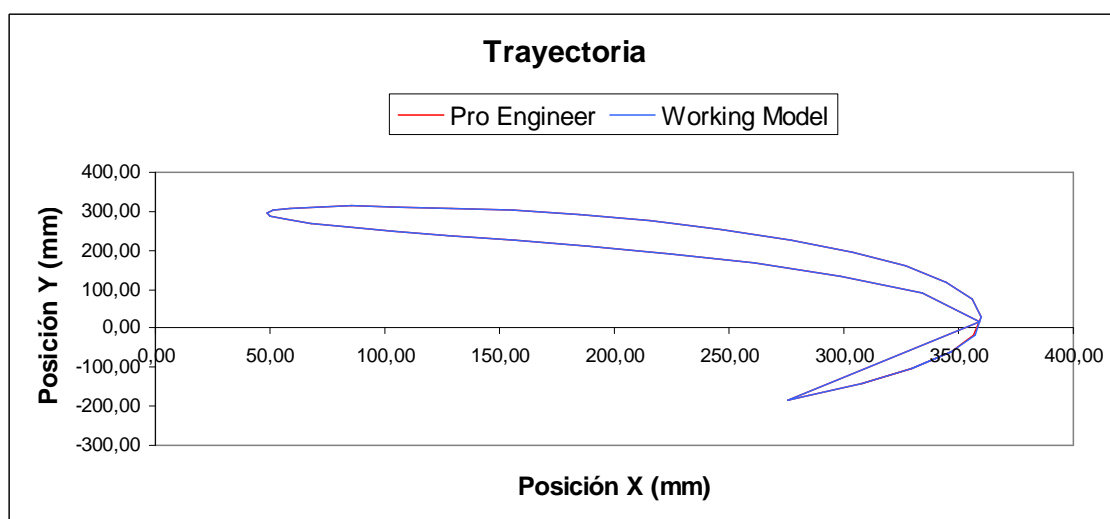


Ilustración 62. Gráfico de trayectoria X frente a Y del Mecanismo 5.

Los datos para el análisis de trayectoria (tabla 7.15) presentan poca dispersión en las medidas frente al resto de análisis. El error para este mecanismo se sitúa en valores de 0,014% para los valores de posición en X y de 0,032% para los de Y. Además del resultado numérico, mediante el resultado gráfico mostrado en la ilustración 62 se puede concluir en que las gráficas son idénticas. Por tanto el error cometido al cambiar de programa es irrelevante.

❖ Análisis global y comentarios:

Este mecanismo sigue una trayectoria elíptica realizando el descenso por la parte más alejada de la curva mostrada en la ilustración 62. En el punto inferior se puede observar un pequeño salto brusco que podría ser solventado mediante modificaciones en el diseño. Las fases del movimiento (ilustración 63) se describen a continuación.

En la primera fase se observa que, sobre la mitad de la fase, la aceleración sufre un aumento muy brusco hasta alcanzar su máximo. Por su parte, la velocidad presenta un descenso controlado que sirve para posicionar el brazo justo en el punto inferior de la trayectoria. Todo esto se desarrolla en aproximadamente 4 segundos.

La segunda fase dura otros 4 segundos y en ella se produce un ascenso brusco de la velocidad seguido de un cambio brusco de tendencia que hace descender la velocidad bruscamente y luego suavizar su caída hasta que la aceleración toma su valor mínimo. Durante estos 4 segundos la aceleración toma el mismo comportamiento que en la 1ª fase pero al revés, es decir disminuyendo bruscamente su valor hasta suavizarse aproximadamente a la mitad de fase.

La tercera fase es mucho más larga y apenas presenta variación en la aceleración, que se mantiene constante en valores próximos a 0 durante los 28 segundos que completan el ciclo. Comienza con el ascenso del brazo, descendiendo su velocidad hasta alcanzar el punto superior. Llegado a ese momento, aproximadamente en el segundo 17, la velocidad cambia su tendencia descendente y aumenta de forma progresiva realizando el descenso del brazo.

Este movimiento, comparado con los anteriores es un movimiento más tosco, que presenta saltos considerables en su trayectoria. La duración del ciclo, como viene siendo común, es de 36 segundos. El recorrido en el eje X se sitúa entre los anteriores mecanismos con un valor de aproximadamente 300mm. El eje Y llega a alcanzar los 500mm de longitud, siendo la mayor longitud obtenida en el análisis de todos los mecanismos.

Como curiosidad, es destacable que éste es el único caso en el que el pico de aceleración supera al de velocidad y presenta sólo un máximo. En el resto de casos se observan 2 máximos en las curvas de aceleración que se corresponden con los movimientos de ascenso y descenso del brazo (ilustración 63).

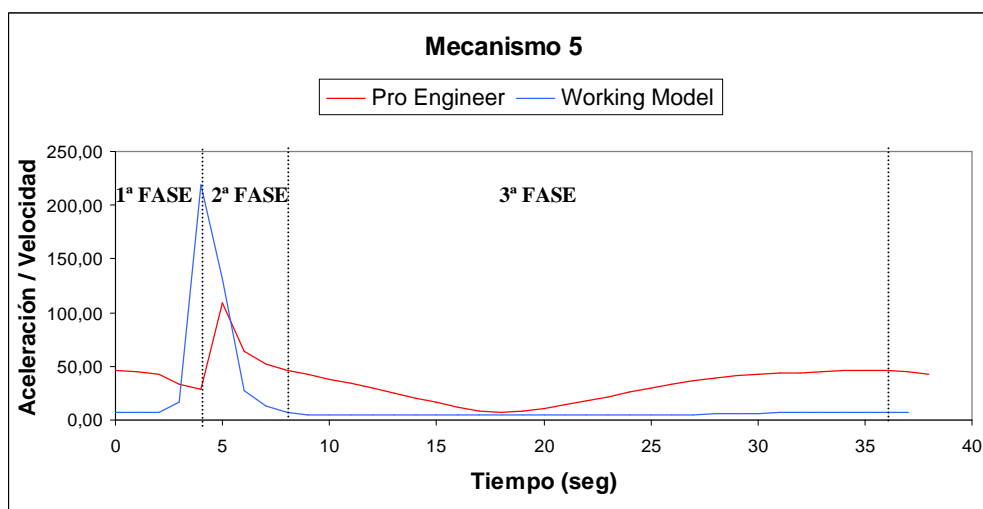


Ilustración 63. Fases del movimiento del Mecanismo5.

7.6 Resumen de datos y selección de mecanismos.

En el presente capítulo se recogen los datos más significativos de los análisis para que, de forma simplificada, se pueda tener una idea de los parámetros más relevantes de los diferentes mecanismos. Se recogerán los datos en la tabla 7.16 de forma que se pueda realizar una comparación rápida entre los distintos mecanismos que previamente han sido analizados.

Para la selección del mecanismo óptimo se tendrán en cuenta 2 parámetros fundamentales. Considerando que la tarea que se va a realizar es la de coger carga en un punto y soltarla en otro, el movimiento deberá de ser suave para minimizar los posibles problemas mecánicos que, de cara a un futuro, puedan originar daños por fatiga o deformación excesiva. En segundo lugar, el recorrido en los ejes X e Y tienen que ser adecuados. El criterio será en este caso la flexibilidad, de forma que se obtenga una relación aproximada. Prima la altura, pero también se desea obtener un buen alcance.

Los datos que se han considerado más relevantes se describen a continuación. Éstos formarán las columnas de la tabla 7.16:

- **MÁX ABCISA (x máx):** Identifica la máxima distancia que el extremo del brazo llega a alcanzar en el eje X. Esta medida es una referencia de la capacidad de alcance del brazo en cada mecanismo. Interesa que sea la máxima posible. Se mide en mm.
- **MÍN ABCISA (x mín):** En este caso se identifica la mínima distancia que existirá entre el punto de referencia y el extremo del brazo. Se mide en mm.
- **MÁX ALTURA (h máx):** Indica la máxima posición que alcanza el extremo del brazo en el eje de ordenadas. Se mide en mm.
- **MÍN ALTURA (h mín):** Indica la mínima posición que alcanza el extremo del brazo en el eje de las Y. Se mide en mm.
- **DISTANCIA X (X):** Representa la distancia que existe entre la máxima y la mínima abcisa. Se mide en mm.
- **DISTANCIA Y (Y):** Representa la distancia que existe entre la máxima y la mínima ordenada. Se mide en mm.
- **EJE MAYOR (a):** Se corresponde con el eje de mayor longitud en la elipse que forma la trayectoria. Refleja la distancia absoluta que existe entre el punto más alejado y el punto más cercano de la trayectoria. Se mide en mm.
- **EJE MENOR (b):** Se corresponde con el eje de menor longitud en la elipse. Representa la distancia que existe entre la trayectoria de subida y la de bajada en la trayectoria recorrida por el brazo. Se mide en mm.
- **MÁX VELOCIDAD (v máx):** Punto e instante en donde se alcanza la máxima velocidad en el movimiento. Se mide en mm/s.

- **MÁX ACELERACIÓN** ($a_{\text{máx}}$): Punto e instante en donde se alcanza la máxima aceleración en el movimiento. Se mide en mm/s^2 .
- **COMENTARIOS:** En este apartado, que se detallará después de la tabla 7.16, se realizarán los comentarios que se consideren oportunos para realizar aclaraciones sobre la cinemática de cada mecanismo.

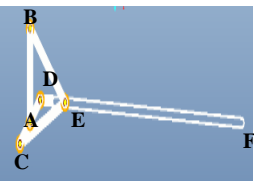
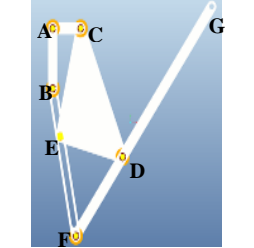
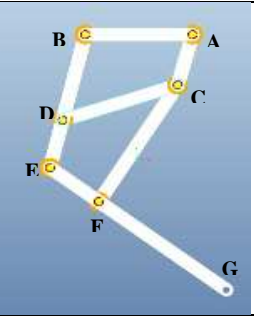
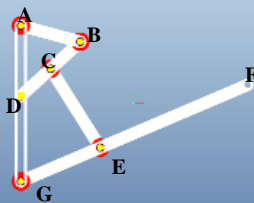
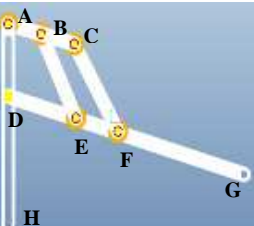
MECANISMO	x máx.	x mín.	h máx.	h mín.	X	Y	a	b	v máx	a máx
1 	742,78	493,04	353,91	-86,84	249,74	440,75	506,59	156,72	79,27	22,67
2 	397,87	40,11	330,80	-39,99	357,76	370,79	512,25	64,63	115,54	44,17
3 	404,13	88,43	-1,18	-419,57	315,7	418,39	524,13	300,75	69,53	17,07
4 	399,60	71,33	268,59	-107,12	328,27	375,71	498,92	0	47,47	18,09
5 	359,98	48,46	313,00	-185,40	311,52	498,4	587,75	64,91	109,54	219,73

Tabla 7.16. Resumen de los datos del análisis cinemático.

- **Mecanismo 1:** El mecanismo 1 realiza un movimiento bastante controlado con una velocidad y aceleración sin cambios bruscos. El máximo impulso se reparte principalmente en el recorrido de subida. Es el mecanismo que obtiene mayores alturas y longitudes en x en relación con el punto de referencia, que siempre está en el centro de masas del eslabón fijo. El recorrido (X,Y) puede estar algo limitado en el eje X, obteniendo el 2º recorrido más largo en el eje Y.
- **Mecanismo 2:** Este mecanismo presenta un movimiento de subida brusco con cambios muy marcados en la velocidad y aceleración. Los datos de velocidad y aceleración máxima son los más altos de la comparación, algo desproporcionados para el movimiento buscado. Con el mecanismo 2 se obtiene el máximo recorrido en el eje X. Sin embargo, el recorrido en el eje Y se considera corto.
- **Mecanismo 3:** En esta ocasión se presenta un mecanismo con un movimiento muy constante, sin variaciones importantes de velocidad y aceleración pero con un buen impulso en la zona alta de su trayectoria. La característica de este mecanismo es que realiza toda la curva de trayectoria por debajo del punto de referencia (todos los datos de posición en Y son negativos). Tiene unos parámetros de recorrido en los ejes X e Y que cumplen con las condiciones buscadas en las tareas típicas de pick & place.
- **Mecanismo 4:** El mecanismo 4 se distingue del resto en que la trayectoria de ascenso y descenso del extremo del brazo es idéntica. Sería la que más se aproxima al movimiento que realiza un brazo humano. En cuanto al movimiento que se obtiene, se trata de un movimiento con aceleraciones y velocidades adecuadas, pero que comparadas con el resto de mecanismos resultan bajas. El recorrido en el eje X es aceptable mientras que en el eje Y resulta ser algo más corto de lo esperado.
- **Mecanismo 5:** Se tiene en este caso un mecanismo de movimientos bruscos. En su trayectoria aparece un “lazo” que hace que la puesta en marcha del mecanismo en condiciones reales pueda resultar complicada. Existe a su vez un importante salto en el punto inferior de la trayectoria, en el sentido ascendente. En dicho salto se recorre algo más de un tercio de la trayectoria de ascenso en un intervalo minúsculo de tiempo, disminuyendo la velocidad de forma desmesurada para alcanzar el punto superior. Este hecho podría ocasionar severos problemas de fatiga en el extremo del brazo, ya que al trabajar bajo carga se ocasionarían vibraciones e inestabilidades que harían oscilar la carga. En cualquier caso, el alcance en Y es el mayor de todos los mecanismos.

Tras realizar la comparación entre los distintos mecanismos estudiados se puede proceder a realizar una primera selección del mecanismo óptimo. Teniendo en cuenta los criterios de selección antes mencionados, los mecanismos 2 y 5 se excluirían por presentar un movimiento poco controlado y con un carácter brusco. El mecanismo 4, aunque tiene la distinción de su trayectoria (que podría considerarse útil para alguna aplicación más exclusiva o rígida) presenta recorridos más cortos que otros mecanismos. Por tanto, los mecanismos 1 y 3 son los que más se ajustan a los parámetros de selección que marca la tarea de pick & place escogida. En principio no se va a discriminar ninguno de los mecanismos para considerar otras características en próximos análisis.

CAPITULO 8. Análisis dinámico de los mecanismos.

El análisis que comienza en este apartado es sigue una metodología con unas características similares al anterior. La diferencia es que en este estudio se tendrán en cuenta tanto los esfuerzos exteriores que se quieran aplicar como las fuerzas dinámicas que existen en la realidad. En concreto se analizará el efecto de la fuerza de la gravedad y una carga en el extremo del brazo. Con ello se pretenden conocer los esfuerzos mecánicos a las que estaría sometido cada uno de los mecanismos en la realidad.

El estudio se ha llevado a cabo sobre cada uno de los mecanismos que se han explicado en capítulos anteriores. Además, tras este estudio se tendrá mayor información del comportamiento de cada uno de los mecanismos y se podrá realizar una selección con un criterio de mayor rigor. Las condiciones de simulación se describen a continuación.

El motor es exactamente el mismo que seleccionamos en el estudio cinemático. Proporcionará un par de giro constante con una velocidad angular de $10^\circ/\text{s}$ ($0,1745\text{rad/s}$ en el S.I.) y el sentido de giro se corresponde con el de las agujas del reloj, es decir, sentido horario. Por tanto, **los resultados cinemáticos obtenidos en el análisis previo sirven para el análisis que se va a realizar**. Al estar el motor obligado a girar a velocidad constante, el motor tendrá que proporcionar mayor par, pero la velocidad, aceleración y posición serán las mismas.

El estudio dinámico en PRO-E permite seleccionar las fuerzas que se consideren oportunas (gravedad y fricción) así como crear las que se deseen. Se ha activado la fuerza de fricción entre eslabones y la fuerza de la gravedad, siendo el valor de ésta última de $9,81\text{m/s}^2$ en el sentido negativo del eje vertical Y. Además se ha cargado el extremo del brazo con una fuerza que tendrá el valor de 10kg (100N) cuya dirección y sentido coinciden con la fuerza de la gravedad.

El análisis pretende ampliar la información obtenida en el apartado anterior y analizar el comportamiento cuando el brazo está sometido a una determinada solicitud. Para ello, en este caso, se obtendrán las reacciones que genera la fuerza escogida en cada punto. Además, se obtendrá la curva de par motor que representa el momento axial en el punto A (motor cinemático).

Para ello se realizará una simulación de 40 segundos y 1 iteración (denominado marco en algunas versiones de PRO-E) por segundo. En este caso, el programa automáticamente toma datos cada periodos muy cortos de tiempo. Al exportar a Excel se pueden obtener cerca de 9000 datos de los cuales 100 pueden estar comprendidos entre un instante y el siguiente. Basta con crear en Excel una lista de los instantes 1 al 40 y utilizar la función BUSCARV para reducir la lista a los datos de interés.

Este análisis sólo se realizará en Pro-E porque la fiabilidad del programa ha sido satisfactoriamente comprobada. El estudio que se encuentra en las siguientes páginas se dividirá en 3 apartados siguiendo el orden:

8.1 Análisis dinámico del Mecanismo 1.

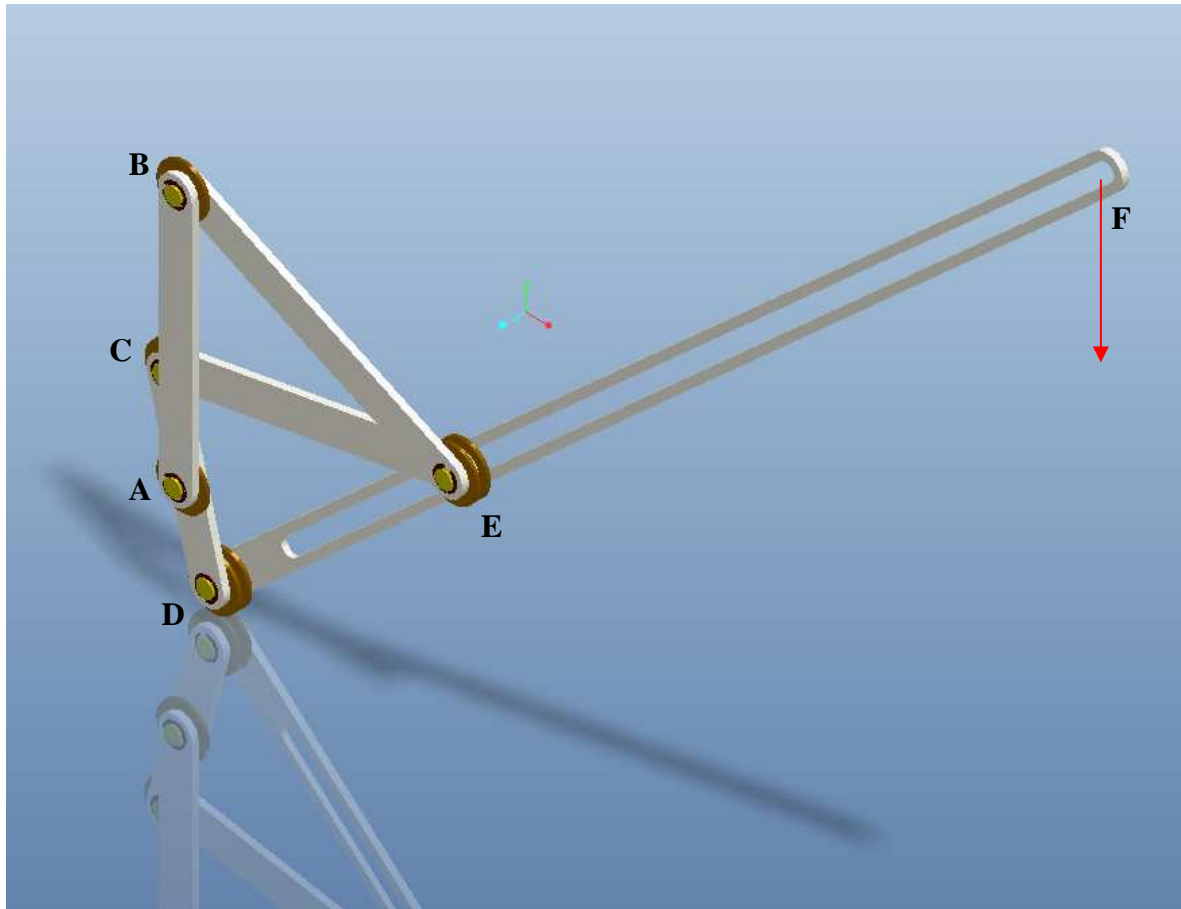


Ilustración 64. Mecanismo 1.

En la ilustración 64 se presenta una captura del ensamblaje del mecanismo 1. A modo de recordatorio se detallan a continuación los aspectos básicos que dominan este mecanismo para posteriormente presentar los datos y análisis del mecanismo.

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 par
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón AB (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)
- **FUERZA VIRTUAL** 10kg = 100N

❖ Reacciones en el mecanismo.

Tiempo (seg)	REACCIONES EN CADA PUNTO (N, kg·m/s ²)				
	PTO. A	PTO. B	PTO. C	PTO. D	PTO. E
0	727,31	795,24	715,16	662,30	662,12
1	862,96	932,87	798,52	694,17	694,01
2	991,71	1062,90	863,94	682,03	681,89
3	1063,41	1135,15	884,32	605,22	605,10
4	1035,29	1106,81	841,35	474,49	474,40
5	918,78	989,22	745,78	335,69	335,62
6	769,82	838,24	629,50	230,55	230,51
7	636,04	701,39	519,41	170,08	170,04
8	535,31	596,40	426,74	145,25	145,22
9	466,44	522,02	352,31	143,50	143,47
10	422,07	470,80	293,36	154,82	154,79
11	394,43	434,99	246,98	172,02	171,97
12	376,88	408,19	211,01	189,76	189,68
13	364,31	385,77	183,94	204,27	204,15
14	353,32	365,14	164,48	213,64	213,48
15	342,38	345,63	151,33	217,94	217,74
16	331,38	327,83	143,23	218,69	218,45
17	320,87	312,62	139,06	217,81	217,54
18	311,41	300,61	138,02	216,95	216,66
19	303,34	291,96	139,64	217,19	216,88
20	296,78	286,53	143,71	219,11	218,79
21	291,74	284,05	150,20	223,05	222,71
22	288,22	284,26	159,20	229,16	228,82
23	286,24	286,95	170,83	237,60	237,25
24	285,93	292,01	185,28	248,49	248,14
25	287,46	299,44	202,73	262,02	261,67
26	291,17	309,37	223,41	278,41	278,07
27	297,52	322,08	247,56	297,93	297,60
28	307,16	338,07	275,49	320,92	320,60
29	321,00	358,11	307,61	347,77	347,46
30	340,35	383,36	344,44	378,94	378,64
31	366,99	415,52	386,73	414,94	414,65
32	403,47	457,04	435,44	456,30	456,03
33	453,26	511,34	491,80	503,34	503,09
34	520,87	582,86	557,12	555,70	555,47
35	611,25	676,54	632,12	611,02	610,81
36	727,31	795,24	715,16	662,30	662,12
37	862,96	932,87	798,52	694,17	694,01
38	991,71	1062,90	863,94	682,03	681,89
39	1063,41	1135,15	884,32	605,22	605,10

Tabla 8.1. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.

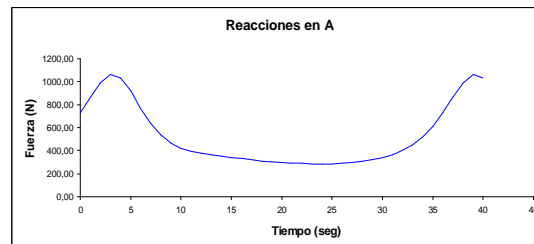


Ilustración 65. Gráfico de reacciones en A (motor)

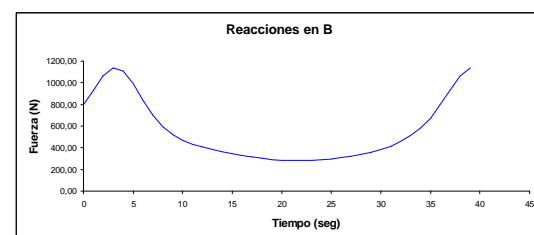


Ilustración 66. Gráfico de reacciones en B.

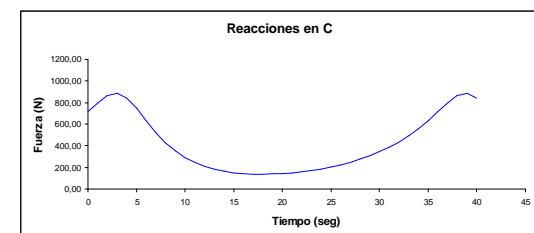


Ilustración 67. Gráfico de reacciones en C.

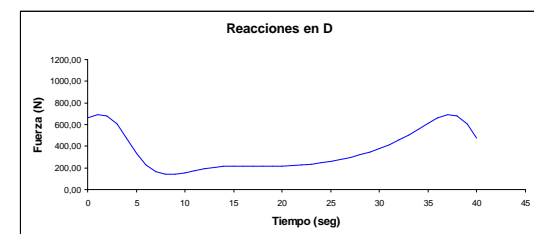


Ilustración 68. Gráfico de reacciones en D.

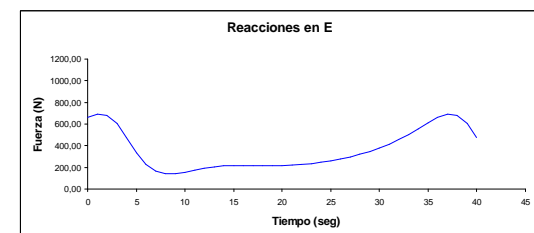


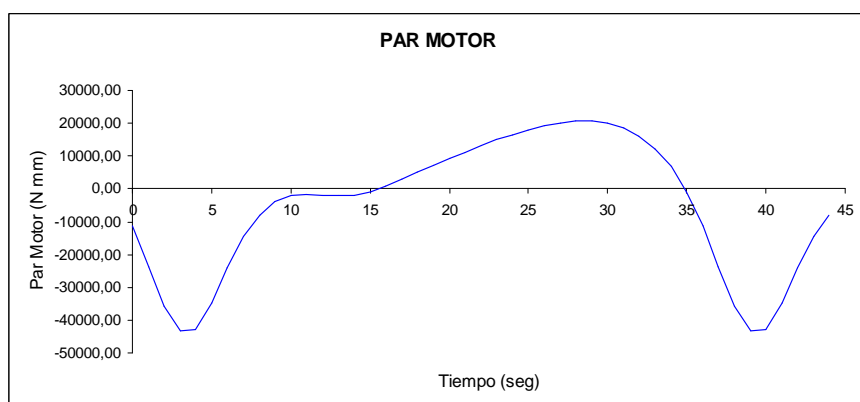
Ilustración 69. Gráfico de reacciones en E.

En la tabla 8.1 se recogen los datos y gráficas individuales (ilustraciones 65 a 69) de las reacciones en cada punto del mecanismo. Es llamativo ver que las reacciones en el pto D y en el pto E son prácticamente idénticas. Los mayores esfuerzos se localizan en los puntos A y B.

❖ **Par motor.**

Tiempo (seg)	Par Motor (N'mm)	Tiempo (seg)	Par Motor (N'mm)
0	-11275,22	23	14915,09
1	-23562,05	24	16552,25
2	-35696,36	25	18006,93
3	-43383,27	26	19227,84
4	-42829,08	27	20147,13
5	-34848,34	28	20677,61
6	-24108,06	29	20708,72
7	-14615,34	30	20100,22
8	-7895,24	31	18672,32
9	-3905,20	32	16191,05
10	-2062,07	33	12349,89
11	-1652,19	34	6758,42
12	-1923,40	35	-1021,15
13	-2162,87	36	-11275,22
14	-1856,62	37	-23562,05
15	-823,91	38	-35696,36
16	816,98	39	-43383,27
17	2820,73	40	-42829,08
18	4968,71	41	-34848,34
19	7124,52	42	-24108,06
20	9220,92	43	-14615,34
21	11228,74	44	-7895,24
22	13132,32	-	-

Tabla 8.2. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.



	Máximo	Mínimo
Par (N'mm)	20708,72	-43383,27
Tiempo (seg)	29	3

Tabla 8.3 Momentos clave del análisis.

Ilustración 70. Curva de par motor para el Mecanismo 1.

Los resultados que se representan en la ilustración 70 representan el momento axial medido en el punto que ejerce de motor, es decir, el punto A del mecanismo. El momento axial es positivo en el sentido de las agujas del reloj. Se recuerda que el motor gira en sentido horario. Por tanto, cuando la curva presenta valores negativos significa que el motor tiene que vencer una cierta resistencia. Cuando ocurre lo contrario, el motor gira gracias al momento que se genera en el punto A.

En el segundo 3, nada más comenzar la marcha y cuando el mecanismo está en su inicio de movimiento ascendente es cuando el motor presenta mayor solicitud. Tras ello, el motor va reduciendo su solicitud hasta el segundo 10. El periodo de tiempo comprendido entre los segundos 10 y 15 se corresponde con el cambio de tendencia ascendente a descendente. En dicho intervalo el motor gira prácticamente en vacío. A partir del segundo 15 el motor gira ayudado por el mecanismo hasta completar el ciclo y alcanzando el máximo en el segundo 29 (tabla 8.3).

❖ Análisis global.

Una vez realizado el estudio dinámico del mecanismo 1 se procede a analizar los resultados en conjunto. Antes de comenzar el estudio se recuerda que los parámetros cinemáticos (velocidad, aceleración y trayectoria) no se ven alterados por la colocación de una carga en el extremo del brazo, ya que se ha impuesto como condición que el motor gire a una determinada velocidad constante (para más información acerca del análisis cinemático véase página 41). Por tanto, colocar la carga aumentará el par solicitado al motor pero no afectará al resto de variables cinemáticas.

En cuanto a la parte dinámica del estudio, las reacciones siguen un patrón común que se puede observar en la ilustración 71. En primer lugar se localiza un máximo aproximadamente a los 4 segundos del inicio. Tras ello se produce un descenso notable y progresivo de las solicitaciones que se va suavizando hasta alcanzar su mínimo. A partir del segundo 25, instante en donde se localiza el mínimo antes mencionado, las solicitaciones vuelven a aumentar hasta alcanzar de nuevo el máximo y así sucesivamente, repitiéndose cíclicamente mientras el mecanismo está en movimiento.

Las reacciones máximas se localizan en los primeros instantes de la trayectoria de ascenso del extremo del brazo, hacia el segundo 4. A partir de ese punto las reacciones empiezan a disminuir hasta que se alcanza el punto superior de la trayectoria (segundo 18), en donde las solicitaciones se mantienen estables durante los primeros 5 segundos de bajada. Una vez alcanzado el mínimo (segundo 25 aproximadamente) se produce un cambio de tendencia en el que las reacciones comienzan a tomar valores cada vez mayores.

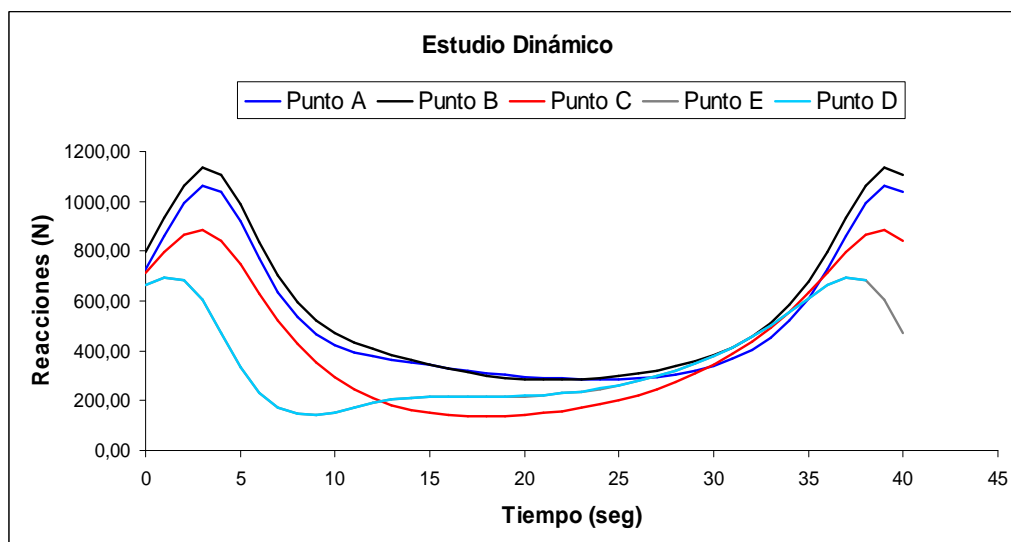


Ilustración 71. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 1.

Es necesario señalar que se ha representado el módulo del vector reacción, por lo que la dirección de las reacciones no está reflejada en la ilustración 71. Apoyándose en la animación gráfica obtenida con PRO-E, cuyas capturas se pueden ver en la ilustración 72, se obtiene una percepción mucho más completa de lo que ocurre. Las reacciones en los extremos de los eslabones tienen sentidos contrarios, lo que genera en todo momento un par de giro sobre el centro del mecanismo.

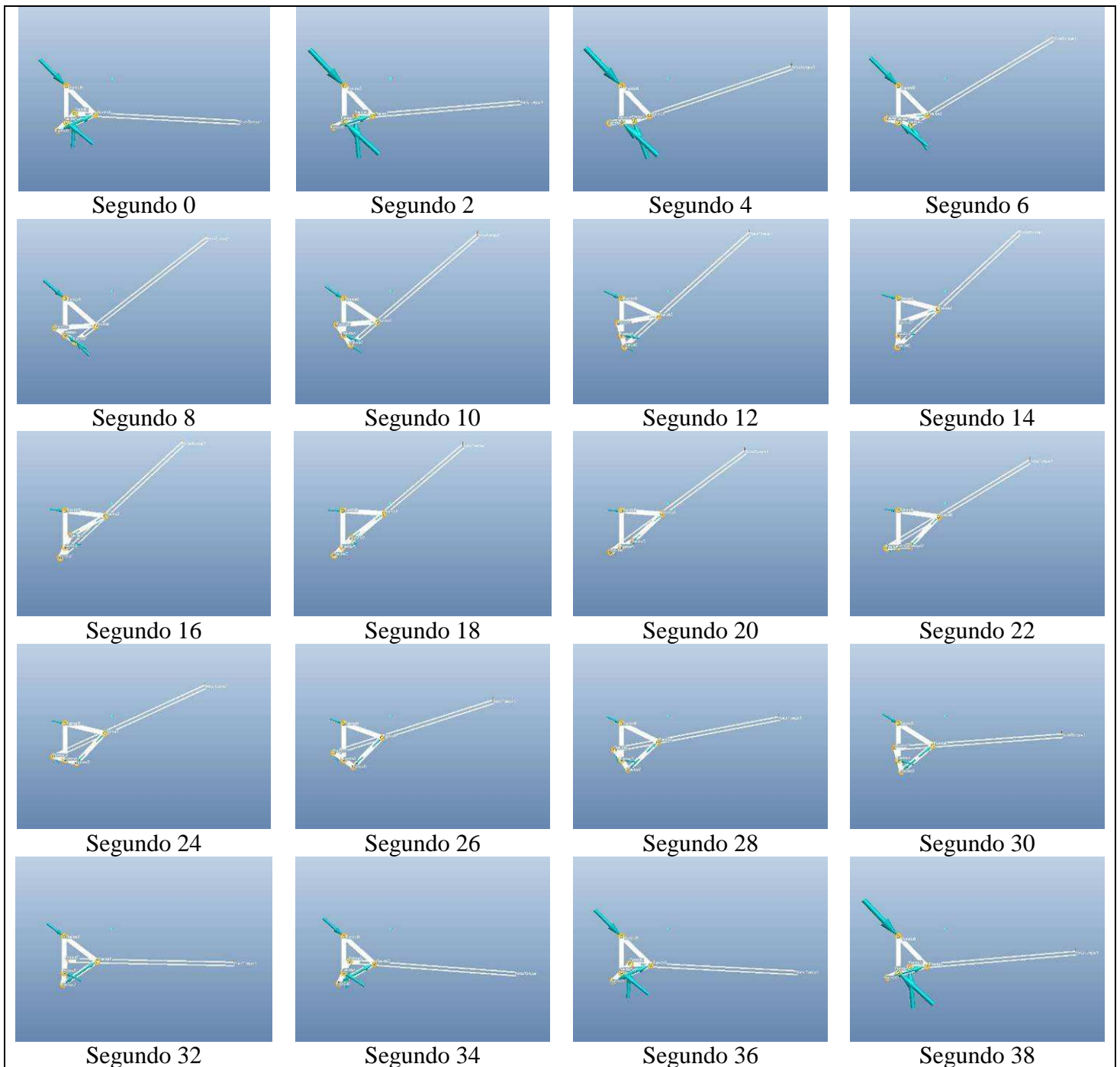


Ilustración 72. Secuencia del movimiento del Mecanismo1.

Como conclusión, el momento dinámicamente más crítico del movimiento se encuentra en el cambio de trayectoria, en el punto inferior, en donde la trayectoria pasa de ser descendente a ascendente. Este instante se produce a los **4 segundos** del inicio de la marcha.

8.2 Análisis dinámico del Mecanismo 2.

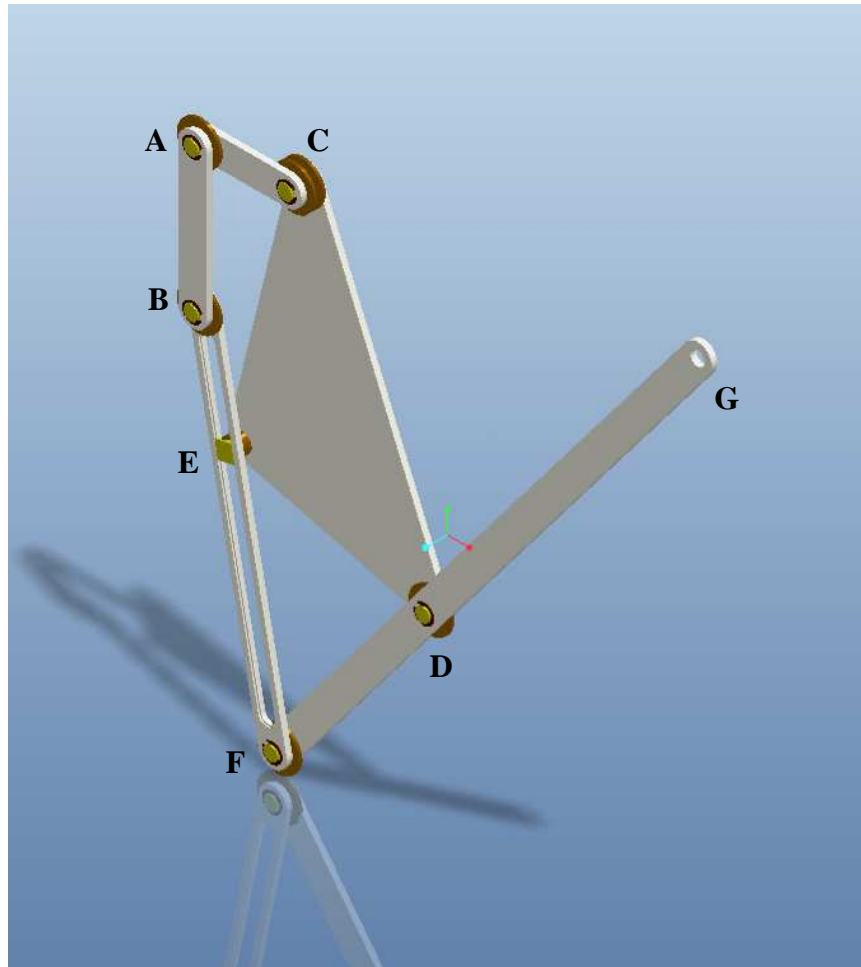


Ilustración 73. Mecanismo 2.

El mecanismo 2 se puede observar en la ilustración 73. Se detallan a continuación las características principales que dominarán el análisis, que se detallará en las páginas siguientes.

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 par
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón AB (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)
- **FUERZA VIRTUAL** 10kg = 100N

❖ Reacciones en el mecanismo.

Tiempo (seg)	REACCIONES EN CADA PUNTO (N, kg·m/s ²)					
	PTO. A	PTO. B	PTO. C	PTO. D	PTO. E	PTO. F
0	333,17	250,80	332,96	322,03	200,84	221,28
1	374,40	290,10	374,19	358,23	249,76	258,87
2	422,54	336,90	422,33	401,92	316,44	305,31
3	481,02	394,52	480,80	458,49	407,09	366,18
4	554,90	468,04	554,69	536,59	531,23	449,95
5	651,59	565,04	651,37	649,41	703,18	569,06
6	780,35	695,30	780,14	814,60	941,95	739,58
7	944,55	863,43	944,34	1044,00	1258,64	970,95
8	1104,73	1032,76	1104,55	1292,73	1593,15	1215,54
9	1116,95	1063,77	1116,81	1368,73	1702,78	1281,19
10	875,97	851,74	875,89	1117,94	1397,20	1020,54
11	554,83	561,84	554,83	755,03	949,53	654,09
12	320,68	355,07	320,73	493,54	627,08	392,60
13	184,31	242,27	184,41	346,77	444,92	245,80
14	111,28	189,21	111,42	269,99	348,07	168,97
15	75,34	167,64	75,53	228,65	295,69	128,79
16	61,00	160,90	61,22	203,96	265,71	106,83
17	57,93	160,62	58,17	186,95	247,05	93,91
18	59,45	162,90	59,70	173,57	234,20	85,71
19	62,26	165,83	62,51	162,02	224,35	80,15
20	64,93	168,38	65,18	151,49	216,02	76,08
21	66,84	169,84	67,09	141,60	208,33	72,63
22	67,67	169,60	67,91	132,21	200,67	68,99
23	67,38	167,11	67,61	123,39	192,55	64,33
24	66,43	161,90	66,63	115,53	183,59	57,85
25	66,12	153,75	66,28	109,54	173,53	48,96
26	68,94	143,01	69,02	106,93	162,40	37,56
27	77,61	130,86	77,61	109,55	150,58	25,18
28	93,32	119,66	93,26	118,62	138,87	20,19
29	115,13	112,72	115,01	134,03	128,45	33,01
30	141,15	113,20	140,99	154,52	120,65	54,55
31	169,68	122,29	169,51	178,47	116,81	79,09
32	199,64	138,85	199,45	204,55	118,18	105,01
33	230,58	160,89	230,38	231,92	125,93	131,80
34	262,64	187,04	262,44	260,31	141,25	159,56
35	296,47	216,86	296,26	290,02	165,58	188,94
36	333,17	250,80	332,96	322,03	200,84	221,28
37	374,40	290,10	374,19	358,23	249,76	258,87
38	422,54	336,90	422,33	401,92	316,44	305,31
39	481,02	394,52	480,80	458,49	407,09	366,18

Tabla 8.4. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.

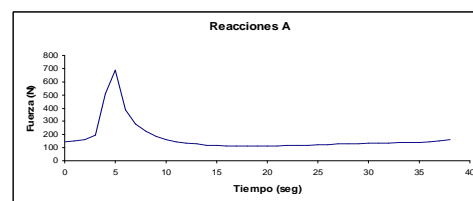


Ilustración 74. Gráfico de reacciones en A

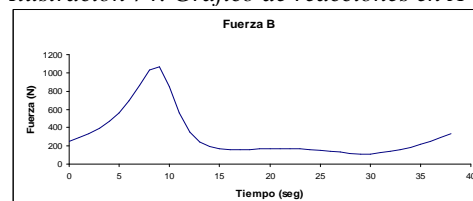


Ilustración 75. Gráfico de reacciones en B.

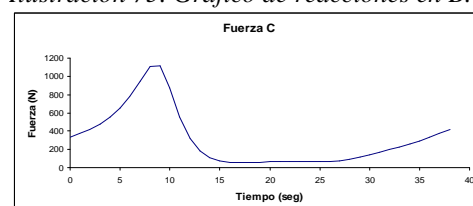


Ilustración 76. Gráfico de reacciones en C.

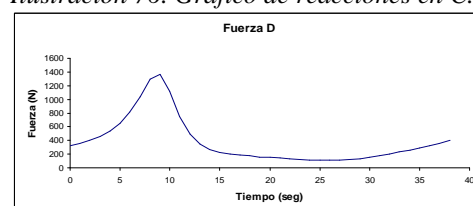


Ilustración 77. Gráfico de reacciones en D.

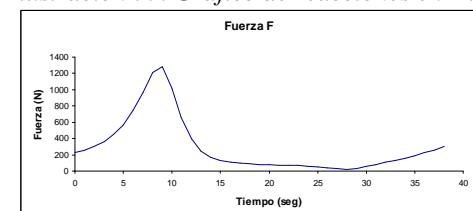


Ilustración 78. Gráfico de reacciones en F.

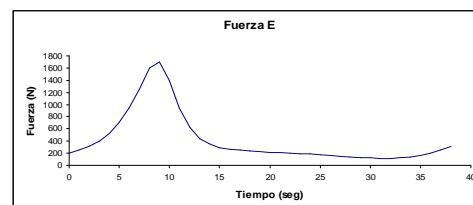


Ilustración 79. Gráfico de reacciones en E.

En la tabla 8.4 se recogen los datos y gráficas individuales de las reacciones en cada punto del mecanismo (ilustraciones 74 a 79). En este caso, las reacciones en los puntos A y C son complementarias (mismo valor pero sentido contrario). Los esfuerzos mayores se localizan en los puntos E y D siendo máximos en el punto E. Se comentarán a continuación los resultados obtenidos de una forma más detallada.

❖ **Par motor.**

Tiempo (seg)	Par Motor (N·mm)	Tiempo (seg)	Par Motor (N·mm)
0	17011,36	23	3685,26
1	17012,82	24	3668,38
2	16226,67	25	3769,84
3	14444,26	26	4072,48
4	11317,63	27	4655,52
5	6190,95	28	5573,04
6	-2222,79	29	6833,75
7	-16175,59	30	8391,06
8	-37187,65	31	10147,88
9	-56116,98	32	11972,25
10	-52185,01	33	13716,04
11	-31560,92	34	15230,15
12	-14562,29	35	16373,00
13	-5290,79	36	17011,36
14	-785,40	37	17012,82
15	1417,39	38	16226,67
16	2557,31	39	14444,26
17	3185,87	40	11317,63
18	3542,18	41	6190,95
19	3732,34	42	-2222,79
20	3808,27	43	-16175,59
21	3803,11	44	-37187,65
22	3748,62	-	-

Tabla 8.5. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.

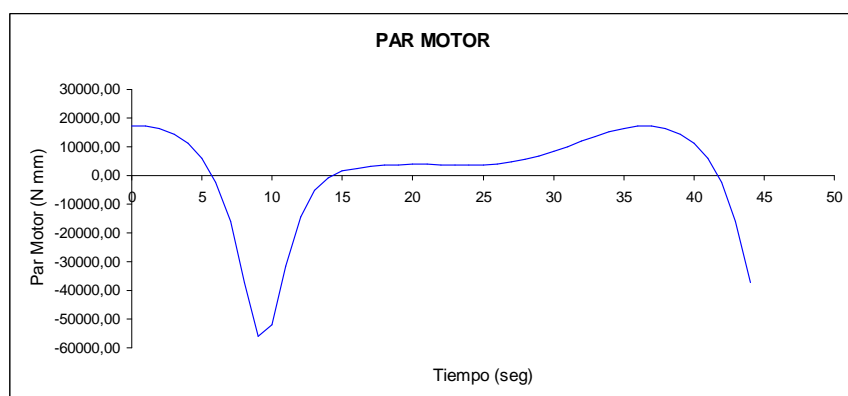


Ilustración 80. Curva de par motor para el Mecanismo 2.

Los resultados que se muestran en la ilustración 80 representan el momento axial medido en el punto que ejerce de motor, es decir, el punto A del mecanismo. Siguiendo el criterio explicado en el análisis del mecanismo 1, se procede a describir el resultado obtenido para el mecanismo 2.

En el segundo 2, nada más comenzar la marcha y cuando el mecanismo está en mitad de su movimiento descendente es cuando el motor presenta su menor sollicitación (máximo en la tabla 8.5). Tras ello, el motor va reduciendo su sollicitación. Al pasar de movimiento descendente a ascendente el motor comienza a presentar una sollicitación que se produce desde el segundo 6 hasta el 14, siendo máxima en el segundo 9, cuando el mecanismo se encuentra en la mitad de su recorrido ascendente. El periodo de tiempo comprendido entre los segundos 15 y 25 se corresponde con el cambio de tendencia ascendente a descendente. En dicho intervalo el motor gira prácticamente en vacío. A partir del segundo 25 el motor gira ayudado por el mecanismo hasta completar el ciclo.

	Máximo	Mínimo
Par (N·mm)	17012,82	-56116,98
Tiempo (seg)	2	9

Tabla 8.6. Momentos clave del análisis.

❖ **Análisis global.**

En el estudio dinámico del mecanismo, la velocidad, aceleración y posición están relacionadas con el movimiento del motor, por lo que el análisis cinemático es válido para los resultados cinemáticos del mecanismo cargado (se puede ver el análisis cinemático en la página 46) ya que el motor gira a velocidad constante. Por tanto, en los puntos más críticos del sistema el par del motor será más alto, y en el resto de tramos el motor tendrá un par mucho inferior, pero siempre girará a la misma velocidad independientemente de la fuerza que tenga que mover el sistema.

Las curvas de reacciones (ilustración 81) presentan un aspecto muy similar a las del mecanismo 1. En este caso, sin embargo, encontramos mayor estabilidad tras el pico de reacción. Se produce tras alcanzar el máximo un descenso grande de las reacciones que se aproximan al valor de 0, manteniéndose prácticamente constantes durante el resto del recorrido.

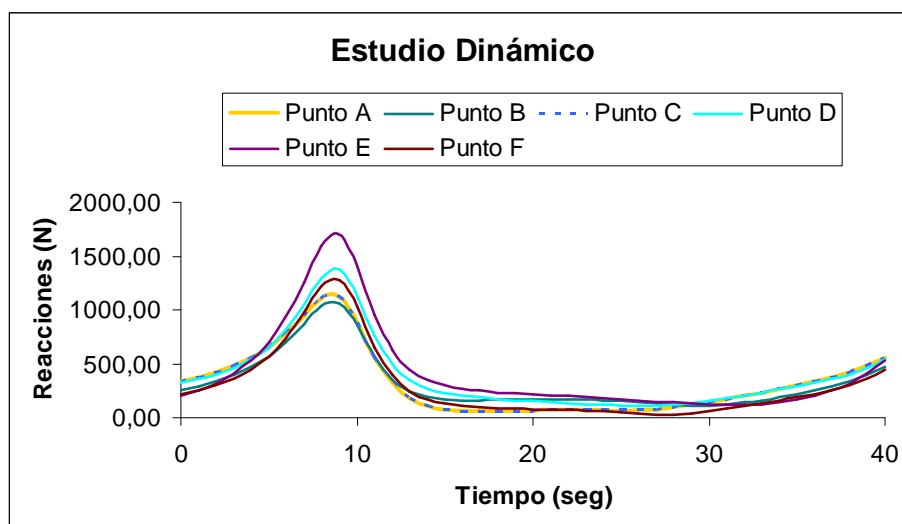


Ilustración 81. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 2.

Las reacciones que se han mostrado en la tabla 8.5 hacen referencia al módulo de las reacciones. Tomando como referencia la animación gráfica se puede observar que las reacciones en los puntos A y B presentan sentidos contrarios, lo que genera un par de giro en el centro del mecanismo. En la manivela, las reacciones se generan en el mismo sentido, al igual que las reacciones en los puntos F y D. La animación gráfica se muestra más adelante en la ilustración 82.

Durante el inicio del movimiento del mecanismo, el extremo del brazo se encuentra en su movimiento descendente. Las reacciones comienzan a aumentar durante la disminución de velocidad, en el cambio de trayectoria de descendente a ascendente. Justo en el momento en el que el extremo del brazo inicia su movimiento ascendente (segundo 8) se encuentran las reacciones máximas, adquiriendo un pico importante. Más tarde se produce un descenso rápido que hacia el segundo 12 se estabiliza, una vez se ha culminado el movimiento de ascenso. La bajada sigue con el mismo patrón de reacciones, es decir, constante y próximo a 0 hasta completar el ciclo de movimiento.

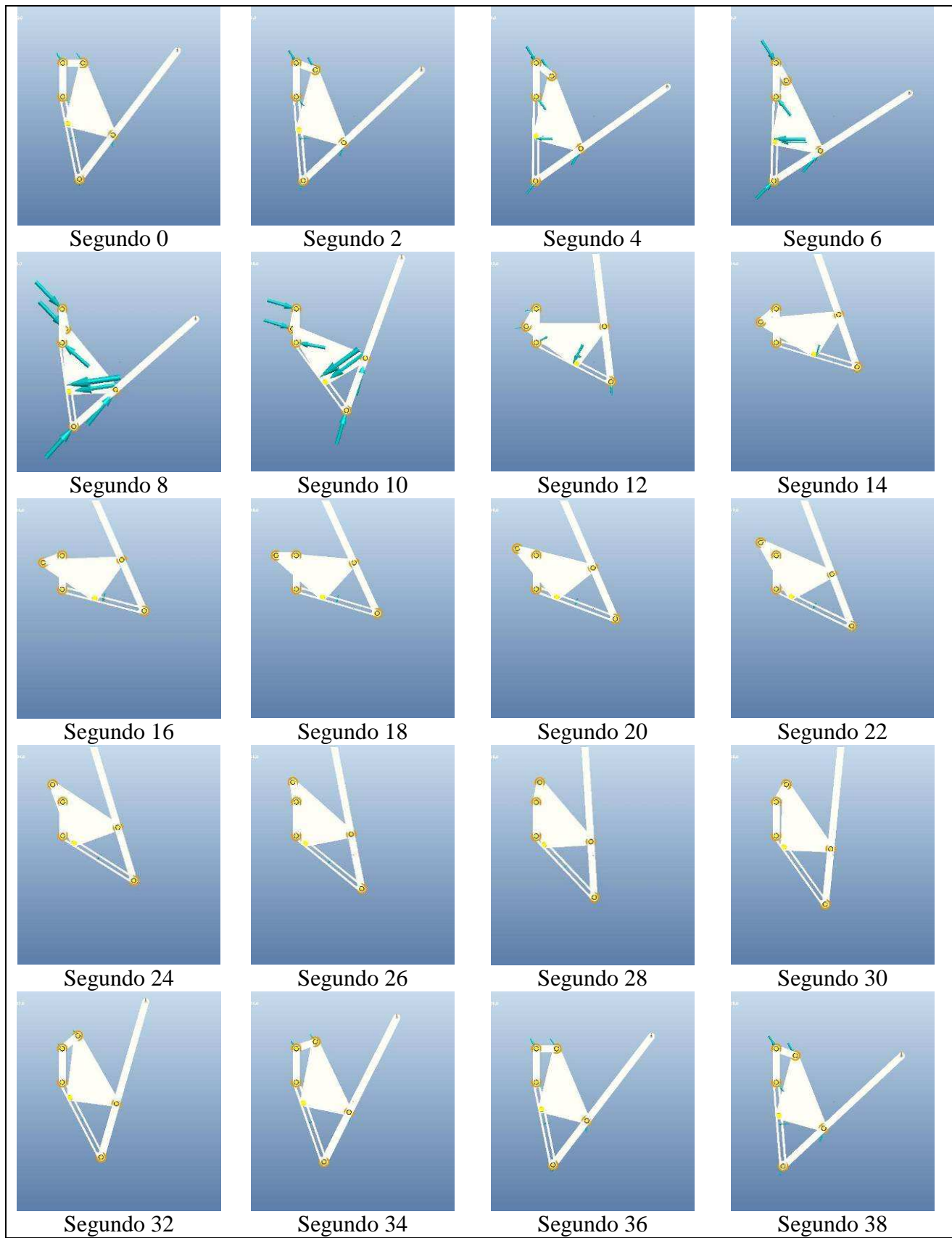


Ilustración 82. Secuencia del movimiento del Mecanismo2.

Según la secuencia gráfica mostrada en la ilustración 82, el momento dinámicamente más crítico del sistema se produce a los **8 segundos** de comenzar el movimiento, justo en el inicio de la trayectoria ascendente.

8.3 Análisis dinámico del Mecanismo 3.

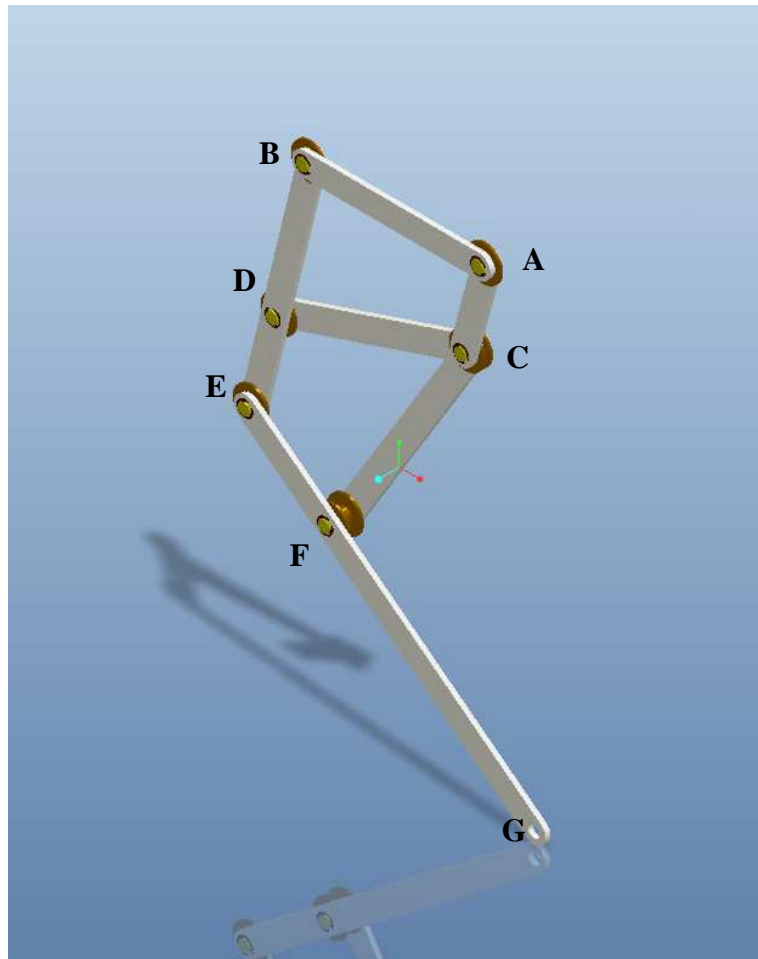


Ilustración 83. Mecanismo 3

La ilustración 83 refleja una captura del ensamblaje del mecanismo 3. Como viene siendo habitual, antes de presentar los datos y comentarios del análisis se realizará un recordatorio de las características principales del mecanismo.

- **Nº ESLABONES:** 6 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 7 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 0 par
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón AB (horizontal)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)
- **FUERZA VIRTUAL** 10kg = 100N

❖ Reacciones en el mecanismo.

Tiempo (seg)	REACCIONES EN CADA PUNTO (N, kg·m/s ²)					
	PTO. A	PTO. B	PTO. C	PTO. D	PTO. E	PTO. F
0	186,83	90,93	186,58	209,07	210,75	289,68
1	183,53	85,03	183,27	208,48	218,33	295,28
2	181,47	80,72	181,21	206,66	226,67	302,24
3	182,22	79,93	181,96	201,62	235,64	310,82
4	189,22	86,87	188,96	189,82	245,14	321,48
5	209,36	109,15	209,10	165,11	254,98	334,69
6	252,95	155,44	252,70	118,97	264,30	350,02
7	322,78	225,05	322,53	48,32	270,15	363,67
8	393,07	292,29	392,82	27,66	267,55	367,18
9	425,37	322,79	425,11	76,31	255,21	355,50
10	416,01	315,09	415,75	88,65	239,69	335,55
11	387,21	290,35	386,97	77,00	228,60	318,35
12	356,22	264,37	355,98	53,05	224,94	309,68
13	329,81	243,36	329,58	22,60	228,21	310,10
14	309,48	228,79	309,26	11,98	236,65	317,81
15	295,03	220,58	294,82	49,57	248,34	330,40
16	285,98	218,22	285,79	89,37	261,43	345,51
17	281,77	220,84	281,58	130,38	274,21	360,99
18	281,59	227,12	281,42	171,25	285,11	374,89
19	284,21	235,25	284,05	210,13	292,76	385,53
20	287,89	243,02	287,74	244,76	296,00	391,51
21	290,58	248,13	290,44	272,68	294,12	391,91
22	290,44	248,66	290,30	291,81	286,97	386,44
23	286,29	243,53	286,15	301,01	275,15	375,63
24	278,07	232,90	277,92	300,64	260,02	360,80
25	266,80	218,07	266,64	292,64	243,47	343,91
26	254,18	201,05	254,01	279,91	227,49	327,04
27	241,88	183,86	241,69	265,47	213,71	311,95
28	231,02	167,89	230,82	251,60	203,07	299,71
29	222,01	153,78	221,80	239,57	195,85	290,66
30	214,71	141,56	214,49	229,82	191,81	284,63
31	208,73	130,91	208,50	222,31	190,49	281,19
32	203,62	121,46	203,39	216,81	191,42	279,87
33	199,05	112,91	198,81	213,06	194,19	280,28
34	194,76	105,02	194,52	210,76	198,49	282,15
35	190,67	97,69	190,42	209,59	204,08	285,30
36	186,83	90,93	186,58	209,07	210,75	289,68
37	183,53	85,03	183,27	208,48	218,33	295,28
38	181,47	80,72	181,21	206,66	226,67	302,24
39	182,22	79,93	181,96	201,62	235,64	310,82

Tabla 8.7. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.

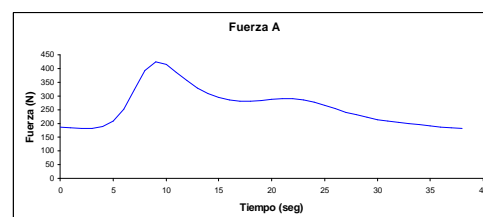


Ilustración 84. Gráfico de reacciones en A.

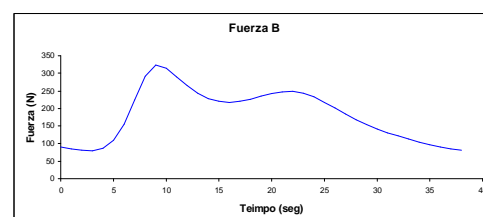


Ilustración 85. Gráfico de reacciones en B.

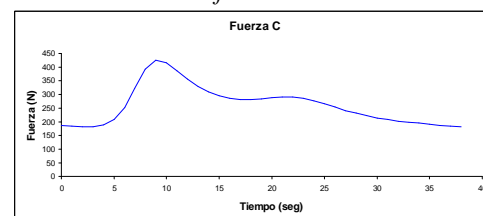


Ilustración 86. Gráfico de reacciones en C.

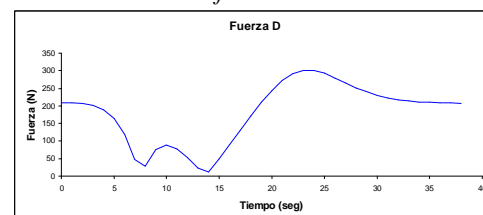


Ilustración 87. Gráfico de reacciones en D.

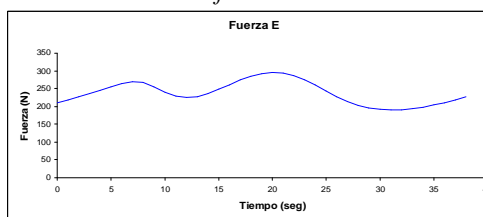


Ilustración 88. Gráfico de reacciones en E.

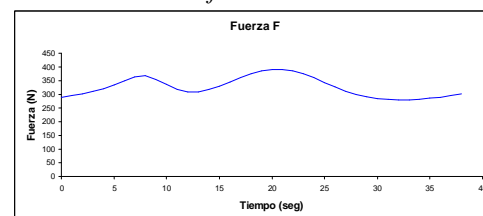


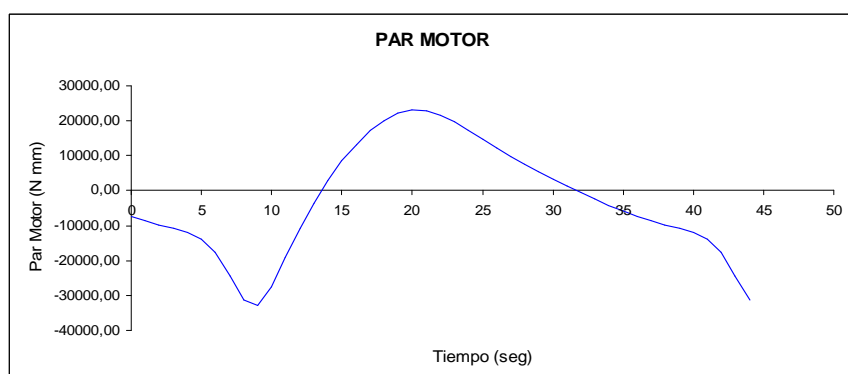
Ilustración 89. Gráfico de reacciones en F.

Las reacciones en cada punto del mecanismo 3 se recogen en la tabla 8.7. Se puede ver que las gráficas (ilustraciones 84 a 89) y los valores de las reacciones en el punto A y en el punto C son prácticamente idénticas. Además, en estos mismos puntos se localizan las reacciones máximas. Existe también un cierto paralelismo en la tipología de algunas gráficas tal y como se detallará en las siguientes páginas.

❖ **Par motor.**

Tiempo (seg)	Par Motor (N'mm)	Tiempo (seg)	Par Motor (N'mm)
0	-7288,19	23	19703,78
1	-8600,30	24	17299,79
2	-9743,92	25	14710,14
3	-10793,31	26	12149,65
4	-11983,35	27	9730,27
5	-13899,28	28	7473,04
6	-17683,10	29	5348,34
7	-24305,62	30	3315,85
8	-31349,93	31	1347,90
9	-32889,83	32	-563,56
10	-27596,02	33	-2408,85
11	-19263,36	34	-4165,24
12	-10903,67	35	-5802,25
13	-3486,29	36	-7288,20
14	2938,73	37	-8600,30
15	8496,36	38	-9743,92
16	13249,57	39	-10793,31
17	17169,99	40	-11983,35
18	20169,04	41	-13899,28
19	22143,61	42	-17683,10
20	23024,03	43	-24305,62
21	22817,79	44	-31349,92
22	21638,19	-	-

Tabla 8.8. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.



	Máximo	Mínimo
Par (N'mm)	23024,03	-32889,83
Tiempo (seg)	20	9

Tabla 8.9. Momentos clave del análisis.

Ilustración 90. Curva de par motor para el Mecanismo 3.

Los resultados que se muestran en la ilustración 90 representan el momento axial medido en el punto que ejerce de motor, es decir, el punto A del mecanismo. Siguiendo el criterio explicado en el análisis del mecanismo 1, se procede a describir el resultado obtenido para este mecanismo.

El mecanismo comienza su movimiento en la fase de ascenso. Es por ello que la curva de par motor muestra una sollicitación que va creciendo hasta llegar a su máximo en el segundo 9, cuando el mecanismo está el momento más crítico de su movimiento ascendente (tabla 8.8). Tras ello, el motor va reduciendo su sollicitación. Al pasar de movimiento ascendente a descendente, el motor comienza a girar ayudado por el par motor que se produce en el punto. El máximo en este periodo se localiza en el segundo 20, cuando el mecanismo se encuentra en la mitad de su recorrido descendente. Por último, existe un periodo de tiempo a partir del segundo 32 y hasta completar el ciclo en el que el motor vuelve a presentar una sollicitación y que coincide con la transición de movimiento descendente a ascendente.

❖ Análisis global.

En el presente estudio no se hablará sobre la parte cinemática ya que no ha cambiado en absoluto con el estudio realizado anteriormente y que se puede ver en la página 51.

En la ilustración 91 se puede observar la tipología de las reacciones generadas en el mecanismo durante el recorrido. En general, las reacciones comienzan elevando su valor a medida que el movimiento del mecanismo avanza en el tiempo y alcanzan su valor máximo hacia el segundo 9. Tras ello las reacciones descienden para volver a alcanzar un máximo en el instante 22 aproximadamente. El primer pico está dominado por las reacciones en los puntos A y C, mientras que el segundo pico toma su valor máximo para la curva de reacciones de F. Este efecto quedará más claro cuando se haga uso de la animación gráfica.

Es curioso ver cómo la tipología de la gráfica obtenida entre los puntos E y F es similar, casi paralela (crece y decrece al mismo ritmo pero a partir de puntos distintos). Lo mismo ocurre entre las gráficas obtenidas en los puntos A y C con respecto a B.

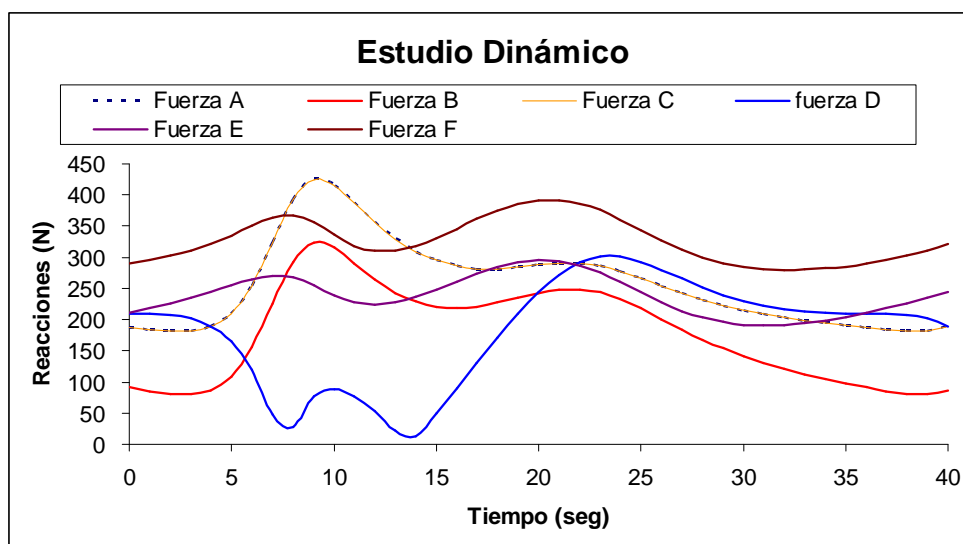


Ilustración 91. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 3.

En la ilustración 92 se observa que las reacciones en A y C siguen el mismo sentido y recuérdese que eran similares. Esto es lo que ocurre en la manivela que acciona el mecanismo. Las reacciones en B son de signo contrario a las que encontramos en A y C y tienen un valor sensiblemente más bajo. Por último encontramos en E y F una cierta compensación de esfuerzos que van en dirección contraria, siendo más bajos los valores de la reacción en el punto E.

Las reacciones máximas se localizan en los puntos superiores del mecanismo (puntos A y C), hacia el instante 9 y justo después del comienzo de la trayectoria ascendente. Posteriormente hacia el segundo 22 se encuentra un nuevo ascenso de las reacciones, que esta vez se hacen máximas en los puntos inferiores del mecanismo (puntos E y F) y se localizan en la mitad de la trayectoria de descenso.

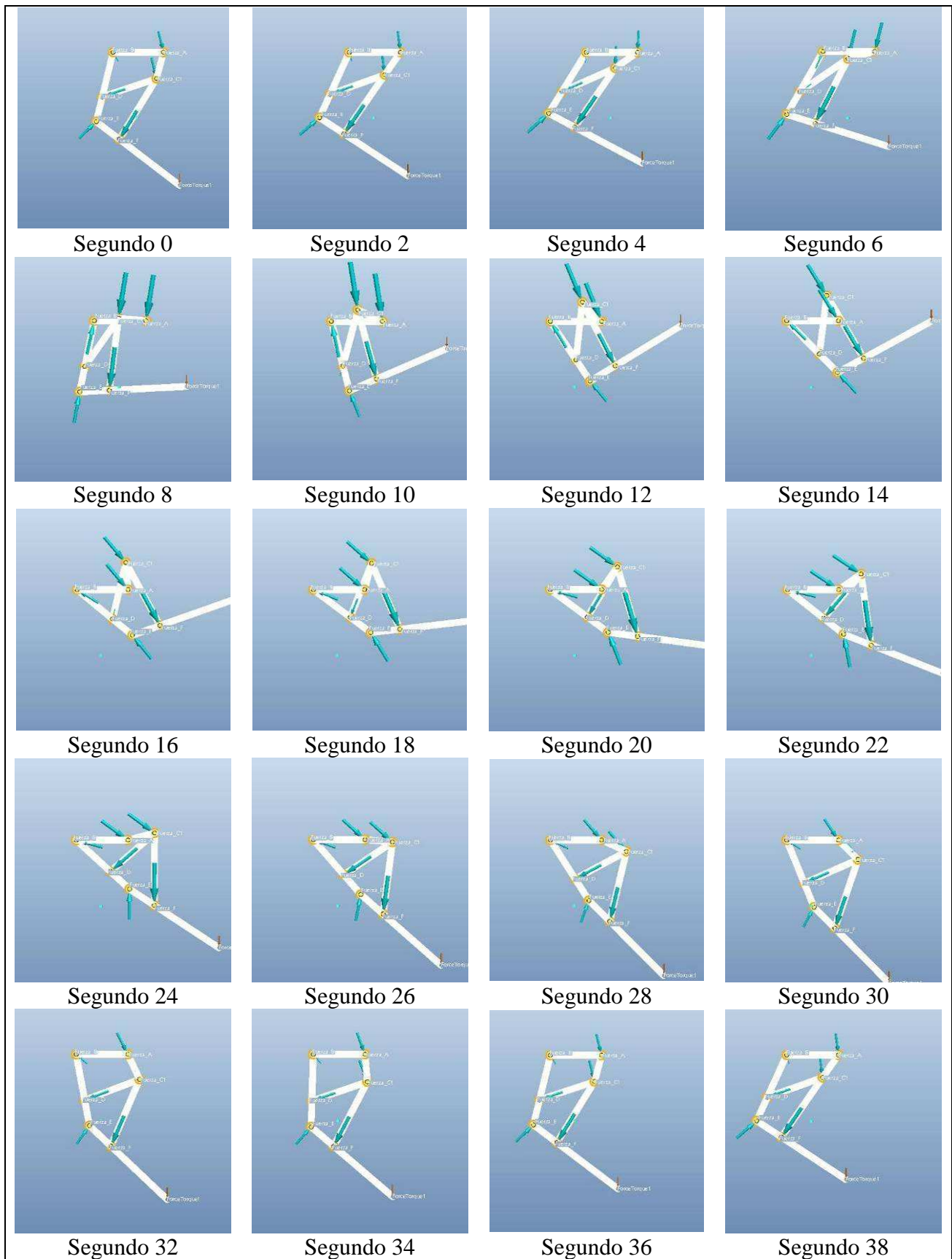


Ilustración 92. Secuencia del movimiento del Mecanismo3.

Aunque tengamos 2 máximos, el momento más crítico del mecanismo se produce tras el comienzo del movimiento ascendente, en el **segundo 9**. En todo caso, habría que estudiar también el comportamiento en la mitad descendente del movimiento.

8.4 Análisis dinámico del Mecanismo 4.

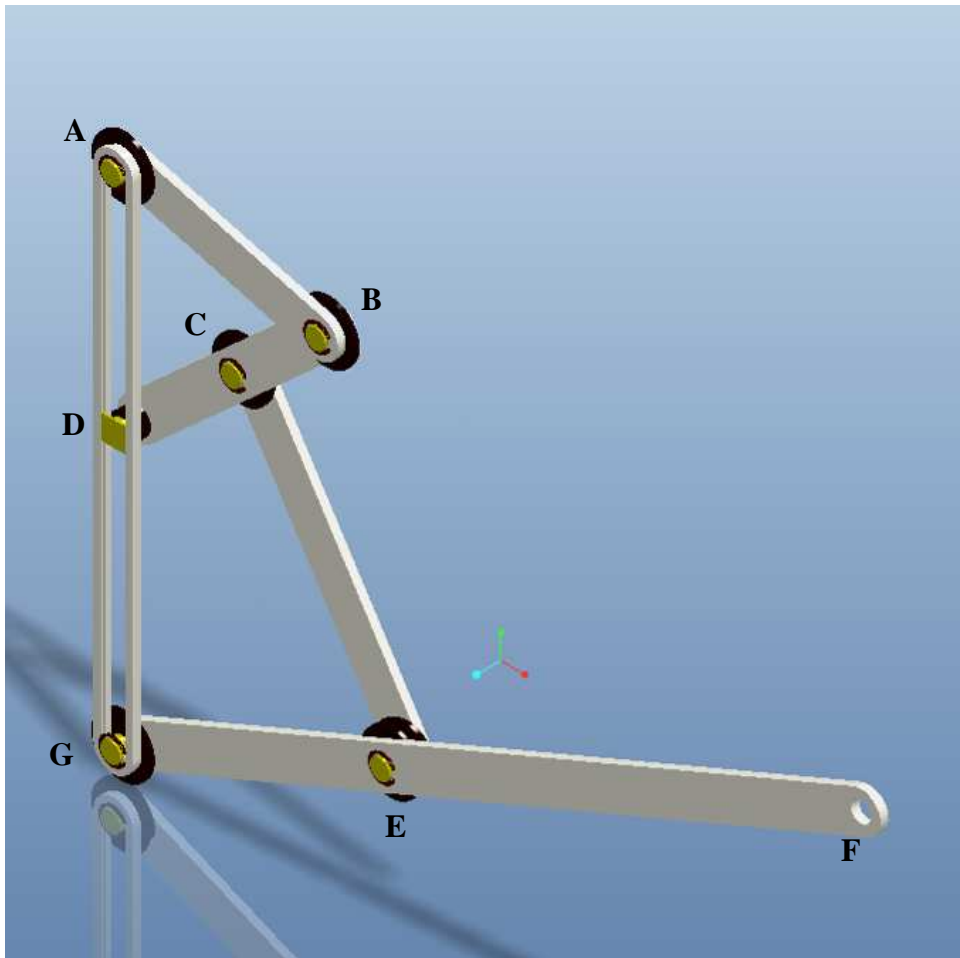


Ilustración 93. Mecanismo 4,

La captura del ensamblaje del mecanismo 4 se puede ver en la ilustración 93. Se presentan las características principales de éste mecanismo y posteriormente se muestran los datos y comentarios del análisis.

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 pares
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón ADG (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)
- **FUERZA VIRTUAL** 10kg = 100N

❖ Reacciones en el mecanismo.

Tiempo (seg)	REACCIONES EN CADA PUNTO (N, kg/m/s ²)					
	PTO. A	PTO. B	PTO. C	PTO. D	PTO. E	PTO. G
0	233,57	233,29	268,88	198,39	268,56	191,38
1	237,95	237,66	292,15	201,16	291,84	218,79
2	247,19	246,90	321,53	203,42	321,24	252,36
3	262,07	261,78	357,40	207,36	357,12	292,62
4	281,37	281,09	399,30	213,88	399,05	339,51
5	301,46	301,20	444,45	222,64	444,21	390,79
6	315,62	315,38	485,09	231,31	484,89	439,26
7	315,38	315,18	507,34	234,79	507,17	471,07
8	296,49	296,32	497,71	227,08	497,57	471,71
9	263,99	263,85	456,02	206,47	455,91	439,12
10	228,26	228,14	396,70	177,20	396,62	386,13
11	197,54	197,43	335,80	144,94	335,71	328,22
12	175,30	175,18	282,18	113,21	282,08	274,63
13	161,30	161,17	238,32	83,45	238,21	228,48
14	153,39	153,25	203,63	56,33	203,49	189,86
15	148,72	148,56	176,62	32,76	176,44	157,86
16	144,53	144,36	155,79	14,19	155,58	131,46
17	138,92	138,74	139,89	1,81	139,65	109,73
18	131,69	131,49	127,92	4,57	127,65	91,79
19	123,98	123,77	119,13	6,62	118,83	76,84
20	117,22	116,98	113,04	6,24	112,72	64,17
21	112,46	112,21	109,51	4,72	109,17	53,25
22	110,60	110,34	108,87	2,68	108,52	43,89
23	112,92	112,64	112,21	0,16	111,85	36,65
24	121,64	121,36	121,77	3,34	121,40	34,85
25	138,98	138,69	139,81	9,14	139,43	45,08
26	161,68	161,39	163,07	19,02	162,69	65,35
27	180,83	180,54	182,55	33,21	182,18	84,18
28	193,28	192,99	195,07	50,42	194,69	97,01
29	201,41	201,12	203,04	69,73	202,66	105,87
30	207,69	207,40	208,98	90,86	208,61	113,17
31	213,50	213,22	214,43	113,62	214,06	120,45
32	219,34	219,06	220,42	137,30	220,06	128,78
33	224,89	224,62	227,85	160,12	227,50	139,09
34	229,16	228,89	237,69	179,18	237,35	152,32
35	231,61	231,33	251,02	191,94	250,68	169,46
36	233,57	233,29	268,88	198,39	268,56	191,38
37	237,95	237,66	292,15	201,16	291,84	218,79
38	247,19	246,90	321,53	203,42	321,24	252,36
39	262,07	261,78	357,40	207,36	357,12	292,62

Tabla 8.10. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.

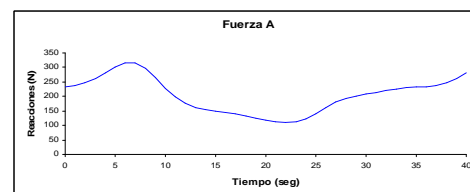


Ilustración 94. Gráfico de reacciones en A.

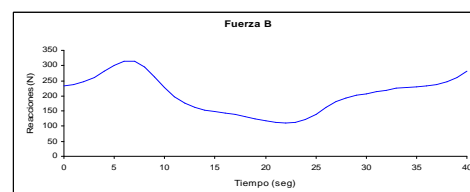


Ilustración 95. Gráfico de reacciones en B.

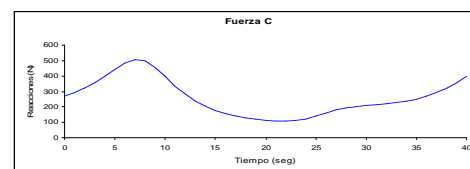


Ilustración 96. Gráfico de reacciones en C.

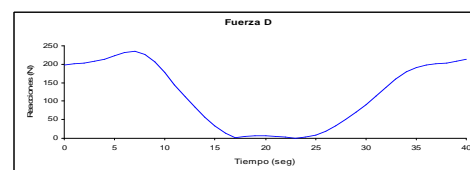


Ilustración 97. Gráfico de reacciones en D.

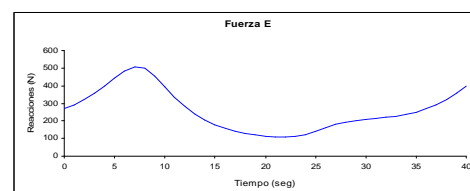


Ilustración 98. Gráfico de reacciones en E.

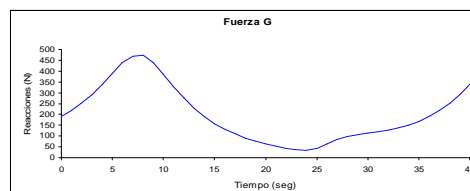


Ilustración 99. Gráfico de reacciones en G.

En la tabla 8.10 se recogen los datos y gráficas de las reacciones en cada punto del mecanismo 4 (ilustraciones 94 a 99). En este mecanismo, las reacciones en los puntos C y E, además de ser máximas en todo el recorrido, son prácticamente idénticas. De la misma manera ocurre en los puntos A y B, en donde éstas varían de manera muy sensible entre ellas debido al valor minúsculo que toma la fuerza de inercia en estos mecanismos.

❖ **Par motor.**

Tiempo (seg)	Par Motor (N'mm)	Tiempo (seg)	Par Motor (N'mm)
0	23332,44	23	-1203,45
1	22597,09	24	-420,76
2	20062,13	25	631,20
3	15511,09	26	2221,05
4	8755,32	27	4340,69
5	-185,05	28	6711,01
6	-10500,27	29	9120,84
7	-19900,17	30	11491,51
8	-25322,69	31	13824,88
9	-25665,30	32	16162,89
10	-22815,00	33	18524,75
11	-19291,30	34	20786,06
12	-16387,27	35	22570,48
13	-14273,31	36	23332,44
14	-12645,97	37	22597,09
15	-11144,71	38	20062,13
16	-9552,28	39	15511,09
17	-7871,37	40	8755,32
18	-6256,09	41	-185,05
19	-4847,79	42	-10500,27
20	-3686,79	43	-19900,17
21	-2737,71	44	-25322,69
22	-1936,17	-	-

Tabla 8.11. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.

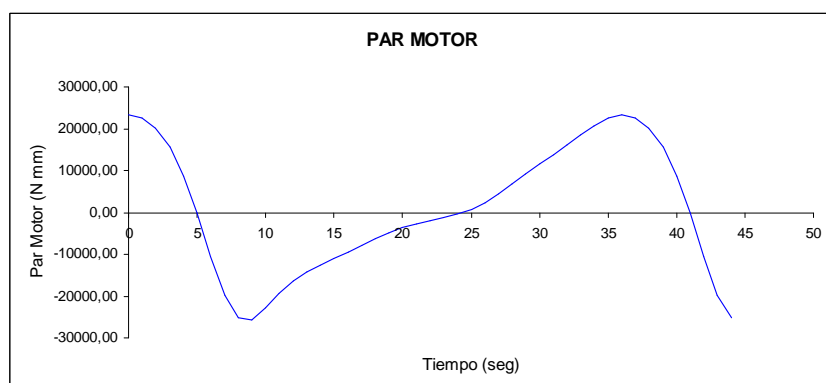


Ilustración 100. Curva de par motor para el Mecanismo 4.

	Máximo	Mínimo
Par (N'mm)	23332,44	-25665,30
Tiempo (seg)	0 ó 36	9

Tabla 8.12. Momentos clave del análisis.

Los resultados que se muestran en la ilustración 100 representan el momento axial medido en el punto que ejerce de motor, es decir, el punto A del mecanismo. Siguiendo el criterio explicado en el análisis del mecanismo 1, se procede a describir el resultado obtenido para este mecanismo.

El mecanismo comienza su movimiento aproximándose a su punto inferior para comenzar el ascenso. Es por ello que hasta el instante 5, cuando se comienza a elevar la carga, el motor gira acompañado por el par motor. Tras ello, se produce sollicitación en el motor localizándose el máximo a los 6 segundos, al comienzo del movimiento ascendente. La sollicitación va disminuyendo hasta que en el segundo 25 el motor vuelve a girar acompañado del par. El brazo se encuentra en su posición más alta en este instante. Por último, destacar el máximo que se produce en esta última fase se encuentra al final del ciclo (segundo 36) cuando el mecanismo se encuentra próximo a finalizar su movimiento de descenso (el inicio y el final del ciclo son el mismo punto. Es por ello que en no hay variación de datos entre el segundo 0 y el 36; véase tabla 8.12).

❖ Análisis global.

La colocación de una carga cuando existe un motor que gira a velocidad constante no afecta cinemáticamente al diseño. Por tanto, los resultados cinemáticos pueden verse en el análisis cinemático del mecanismo realizado en apartados anteriores (página 56).

El patrón que siguen las reacciones se describe a continuación. Aproximadamente, a los 6 segundos del inicio del movimiento se produce un máximo en prácticamente todas las reacciones. Luego se produce un descenso para volver a retomar la tendencia ascendente en los instantes finales del movimiento. Este patrón se muestra en la ilustración 101.

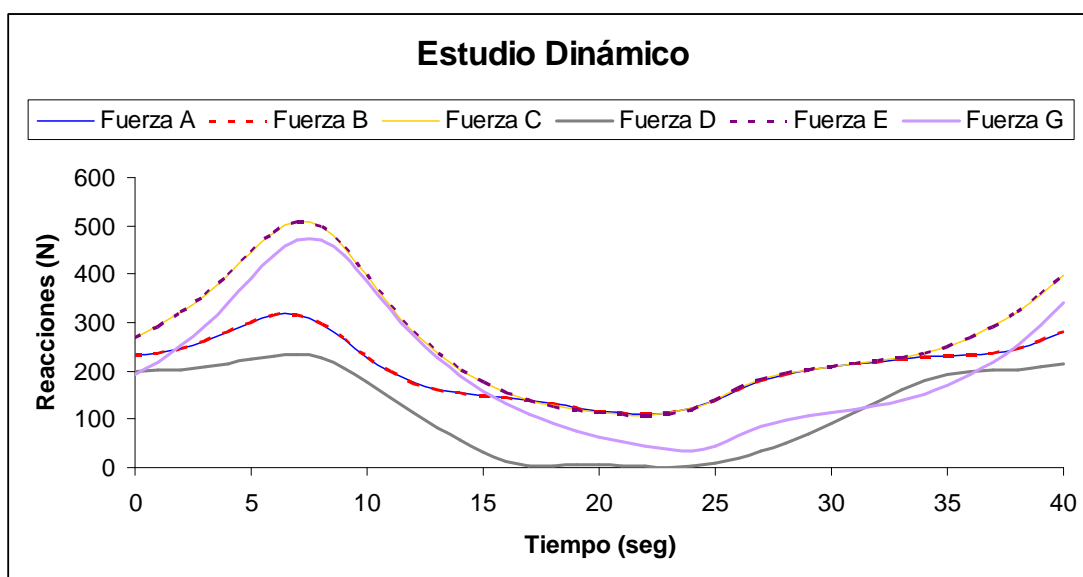


Ilustración 101. Gráfico conjunto de reacciones en Mecanismo4.

Para ilustrar de una manera más real lo que ocurre durante el movimiento del mecanismo se recurrirá a la animación gráfica del movimiento. En la animación mostrada en la ilustración 102 se observa que las reacciones en los puntos A y B siguen el mismo sentido y dirección, mientras que en la parte inferior del mecanismo, en los puntos C y D las direcciones son las mismas pero el sentido es contrario. Es decir, se produce un fenómeno de compresión en el eslabón CD.

Las reacciones máximas se localizan en los primeros instantes de la trayectoria de ascenso del extremo del brazo, hacia el segundo 8 y en los puntos C y D. A partir de ese punto las reacciones empiezan a disminuir hasta que se alcanza el punto superior de la trayectoria (segundo 24, en donde las solicitaciones alcanzan su valor mínimo). Una vez alcanzado el mínimo se produce un cambio de tendencia en el que las reacciones comienzan a tomar valores cada vez mayores. Este efecto coincide con la aproximación del brazo al punto inferior de la trayectoria, en donde se produce el cambio de dirección y comienza el ascenso del brazo nuevamente.

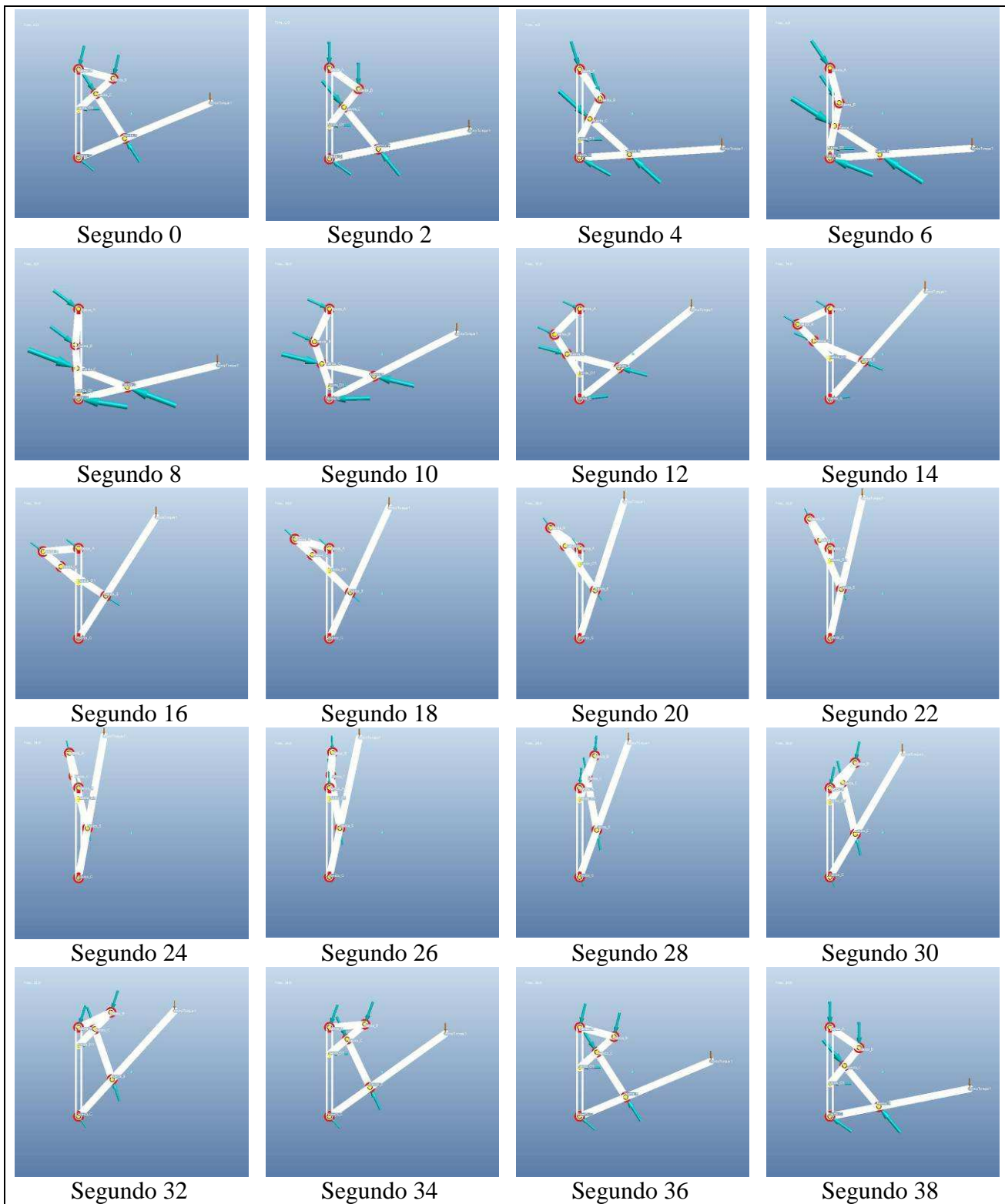


Ilustración 102. Secuencia del movimiento del Mecanismo4.

A la vista de la animación gráfica mostrada en la ilustración 102 se puede apreciar el momento dinámicamente más crítico del sistema. En este mecanismo se produce en el **instante 8**. Este momento se origina justo en los primeros momentos de la trayectoria ascendente, en donde el mecanismo en conjunto tiene la estricta función de elevar la carga.

8.5 Análisis dinámico del Mecanismo 5.

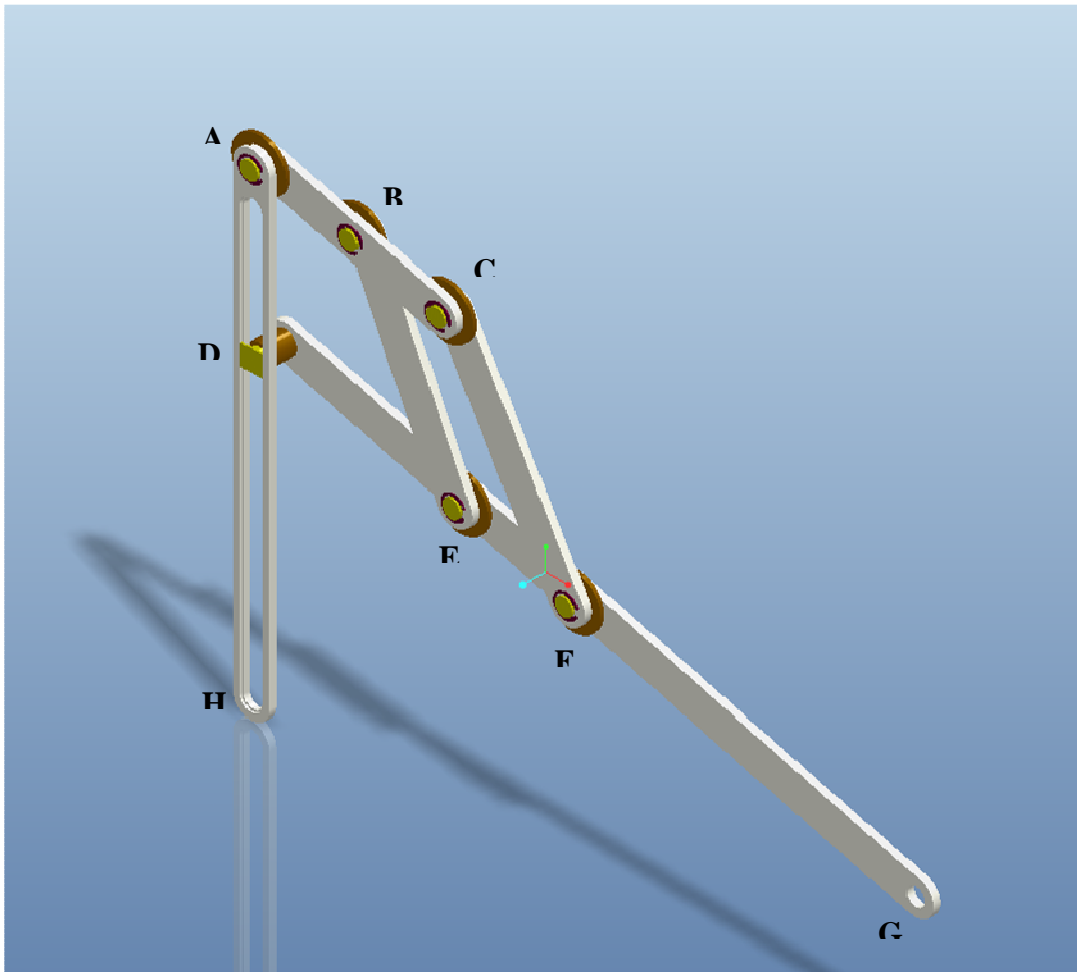


Ilustración 103. Mecanismo 5.

La ilustración 103 representa una captura del ensamblaje del mecanismo 5. Para la mejor comprensión del análisis posterior se recordarán las características básicas de este mecanismo a continuación:

- **Nº ESLABONES:** 5 eslabones
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 1GDL:** 5 pares
- **Nº PARES CINEMÁTICOS 2GDL:** 1 pares
- **GRADOS DE LIBERTAD:** 1 GDL
- **ESLABÓN FIJO:** Eslabón ADH (vertical)
- **PUNTO MOTOR:** Punto A
- **VELOCIDAD MOTOR** 10°/s (cte y en sentido horario)
- **FUERZA VIRTUAL** 10kg = 100N

❖ Reacciones en el mecanismo.

Tiempo (seg)	REACCIONES EN CADA PUNTO (N, kg·m/s ²)					
	PTO. A	PTO. B	PTO. C	PTO. D	PTO. E	PTO. F
0	143,25	479,36	615,88	100,71	479,66	615,57
1	148,26	581,67	720,57	107,72	581,97	720,26
2	160,03	732,60	877,51	123,41	732,91	877,19
3	197,10	1032,25	1196,52	168,74	1032,55	1196,21
4	508,04	2500,28	2831,78	497,73	2500,58	2831,48
5	687,63	189,63	844,20	680,04	189,87	844,10
6	383,29	92,77	307,59	369,51	92,53	307,55
7	278,84	132,81	169,89	259,57	132,57	169,89
8	222,27	138,77	106,23	197,55	138,52	106,24
9	186,56	136,55	68,82	156,29	136,29	68,83
10	162,47	132,59	43,70	126,56	132,33	43,72
11	145,75	128,97	25,42	104,24	128,71	25,43
12	134,05	126,43	11,47	87,13	126,16	11,47
13	125,89	125,14	0,59	73,97	124,87	0,59
14	120,28	125,01	7,95	63,95	124,74	7,99
15	116,51	125,78	14,41	56,55	125,51	14,47
16	114,10	127,02	18,89	51,40	126,75	18,98
17	112,72	128,17	21,29	48,26	127,89	21,41
18	112,14	128,52	21,32	46,88	128,24	21,47
19	112,22	127,23	18,57	47,09	126,94	18,74
20	112,90	123,37	12,48	48,67	123,08	12,67
21	114,11	115,97	2,45	51,41	115,67	2,67
22	115,79	104,14	12,10	55,05	103,85	11,87
23	117,87	87,28	31,56	59,29	86,98	31,31
24	120,20	65,22	55,96	63,81	64,92	55,69
25	122,63	38,37	84,82	68,28	38,07	84,54
26	125,02	7,67	117,25	72,47	7,36	116,97
27	127,25	25,78	152,23	76,27	26,09	151,94
28	129,32	61,13	188,99	79,66	61,43	188,70
29	131,22	98,08	227,31	82,71	98,38	227,01
30	132,98	136,99	267,52	85,48	137,29	267,23
31	134,62	178,68	310,45	88,01	178,98	310,15
32	136,13	224,29	357,16	90,30	224,59	356,87
33	137,55	275,16	408,96	92,42	275,45	408,66
34	138,96	332,83	467,42	94,51	333,12	467,12
35	140,65	399,53	534,91	96,98	399,83	534,60
36	143,25	479,36	615,88	100,71	479,66	615,57
37	148,26	581,67	720,57	107,72	581,97	720,26
38	160,03	732,60	877,51	123,41	732,91	877,19
39	197,10	1032,25	1196,52	168,74	1032,55	1196,21

Tabla 8.13. Reacciones en todos los puntos del mecanismo.

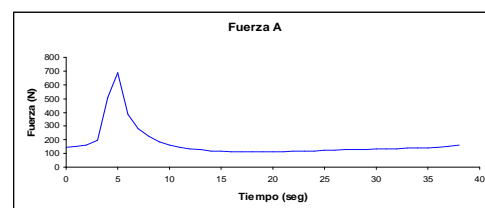


Ilustración 104. Gráfico de reacciones en A.

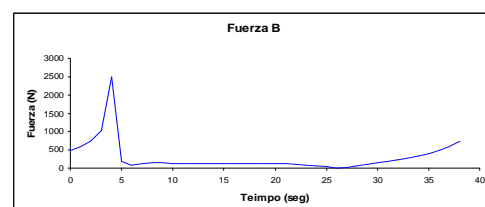


Ilustración 105. Gráfico de reacciones en B.

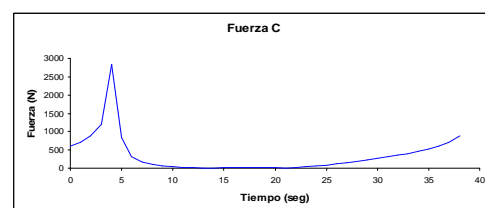


Ilustración 106. Gráfico de reacciones en C.

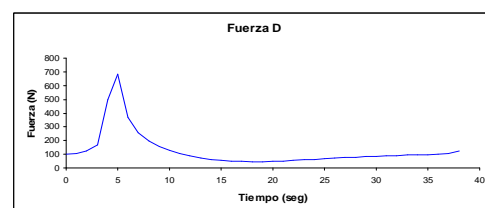


Ilustración 107. Gráfico de reacciones en D.

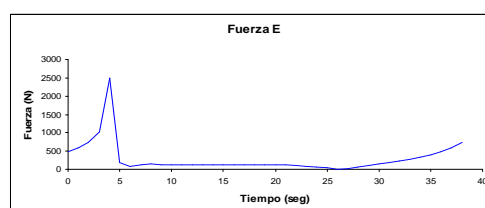


Ilustración 108. Gráfico de reacciones en E.

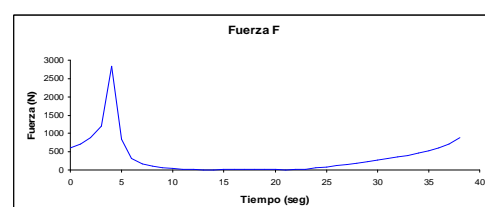


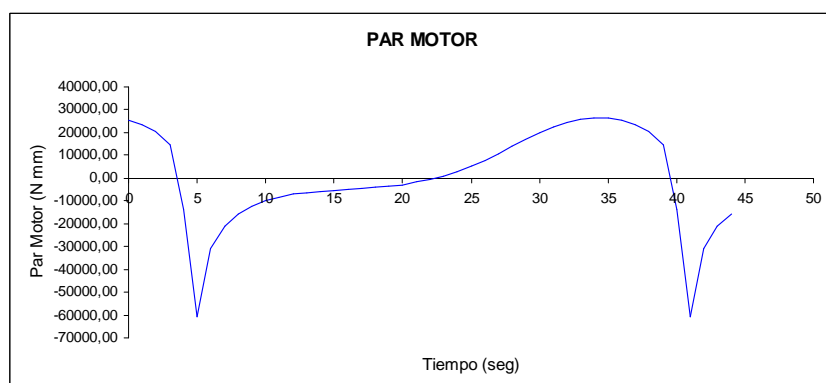
Ilustración 109. Gráfico de reacciones en F.

Las reacciones en cada punto del mecanismo 5 (tabla 8.13 e ilustraciones 105 a 109) siguen un patrón común, tomando un pico en el segundo 4 y siendo máximas en los puntos C y F. En dichos puntos las reacciones son prácticamente idénticas. Lo mismo ocurre entre los puntos B y E. También existe similitud entre las gráficas de los puntos A y D, esta vez con mayor dispersión entre los datos.

❖ **Par motor.**

Tiempo (seg)	Par Motor (N·mm)	Tiempo (seg)	Par Motor (N·mm)
0	25412,00	23	1094,44
1	23517,17	24	3037,80
2	20353,61	25	5339,95
3	14569,75	26	7973,19
4	-13952,34	27	10861,51
5	-60514,00	28	13883,35
6	-30930,58	29	16887,41
7	-20968,16	30	19712,81
8	-15579,80	31	22205,01
9	-12154,74	32	24224,72
10	-9831,38	33	25651,10
11	-8219,96	34	26381,63
12	-7098,97	35	26329,24
13	-6318,82	36	25412,01
14	-5765,87	37	23517,16
15	-5347,03	38	20353,61
16	-4982,67	39	14569,75
17	-4602,89	40	-13952,34
18	-4145,67	41	-60514,00
19	-3555,54	42	-30930,58
20	-2782,18	43	-20968,16
21	-1778,69	44	-15579,80
22	-500,33	-	-

Tabla 8.14. Tabla de datos del Par Motor del mecanismo.



	Máximo	Mínimo
Par (N·mm)	23332,44	-25665,30
Tiempo (seg)	0 ó 36	9

Tabla 8.15. Momentos clave del análisis.

Ilustración 110. Curva de par motor para el Mecanismo 5.

Los resultados que se muestran en la ilustración 110 representan el momento axial medido en el punto que ejerce de motor, es decir, el punto A del mecanismo. Siguiendo el criterio explicado en el análisis del mecanismo 1, se procede a describir el resultado obtenido para este mecanismo.

El mecanismo comienza su movimiento aproximándose a su punto inferior para comenzar el ascenso. Es por ello que hasta el instante 3, cuando se comienza a elevar la carga, el motor gira acompañado por el par motor. Tras ello, se produce sollicitación en el motor localizándose el máximo a los 5 segundos (tabla 8.15), al comienzo del movimiento ascendente y que tiene el mismo carácter brusco que caracteriza a este mecanismo. La sollicitación va disminuyendo hasta que se estabiliza en el segundo 10. A partir de entonces y hasta el segundo 22 el motor apenas sufre sollicitación y prácticamente no se aprecia par en el motor (parte superior del movimiento). En el segundo 23 el motor comienza a girar apoyado por el motor hasta encontrar su máximo en el segundo 34, cuando el mecanismo está en la mitad de su recorrido descendente.

❖ **Análisis global.**

En primer lugar, como ya se comentó anteriormente y se viene haciendo frecuentemente a lo largo del presente documento, la comparación con el análisis cinemático arroja la conclusión de que los resultados de velocidad, aceleración y posición no dependen en absoluto de la carga que se imponga al sistema. Dicho análisis se encuentra en la página 61 del documento.

En la ilustración 111 se puede observar la tipología de las reacciones generadas en el mecanismo durante el recorrido. En general, las reacciones comienzan elevando su valor de forma muy brusca mientras que el movimiento del mecanismo avanza en el tiempo y alcanzan su valor máximo hacia el segundo 4. Tras ello los esfuerzos en los pares cinemáticos prácticamente desaparecen. Los esfuerzos de mayor valor se producen en los puntos C y F, puntos en los que además la curva de reacción es prácticamente idéntica. Es curioso que las curvas se agrupan por parejas, siendo similares en los puntos anteriormente citados y en los puntos A – D y B – E respectivamente.

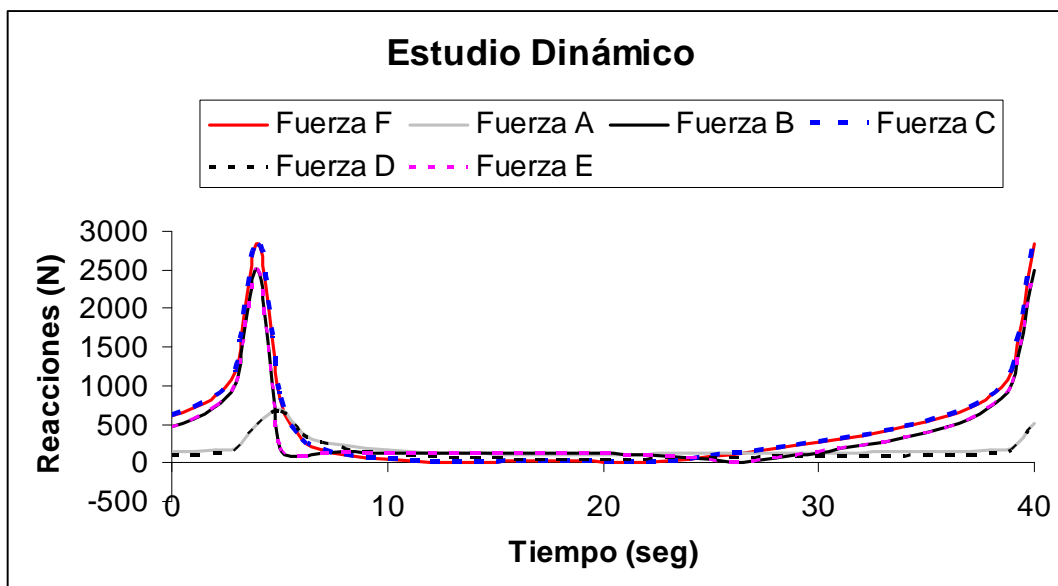


Ilustración 111. Gráfico conjunto de reacciones en el Mecanismo 5.

Sin embargo, que las gráficas sean prácticamente idénticas no indica que la reacción sea exactamente igual. En la ilustración 112 se observa que las reacciones en A y D siguen el mismo sentido y recuérdese que eran similares (del mismo orden). Además son las reacciones más pequeñas que surgen. Lo mismo ocurre entre los puntos B y E y los puntos C y F. Se llega a la conclusión de que los esfuerzos se transmiten desde el eslabón DEF al eslabón ABC.

Las reacciones máximas se producen hacia el instante 4 y al comienzo de la trayectoria ascendente justo antes de que se produzca el salto brusco en la trayectoria. Es llamativo que justo después del salto, una vez se supone que se ha superado el esfuerzo de elevar la carga, las reacciones desaparecen y se mantienen en valores muy reducidos durante toda la trayectoria.

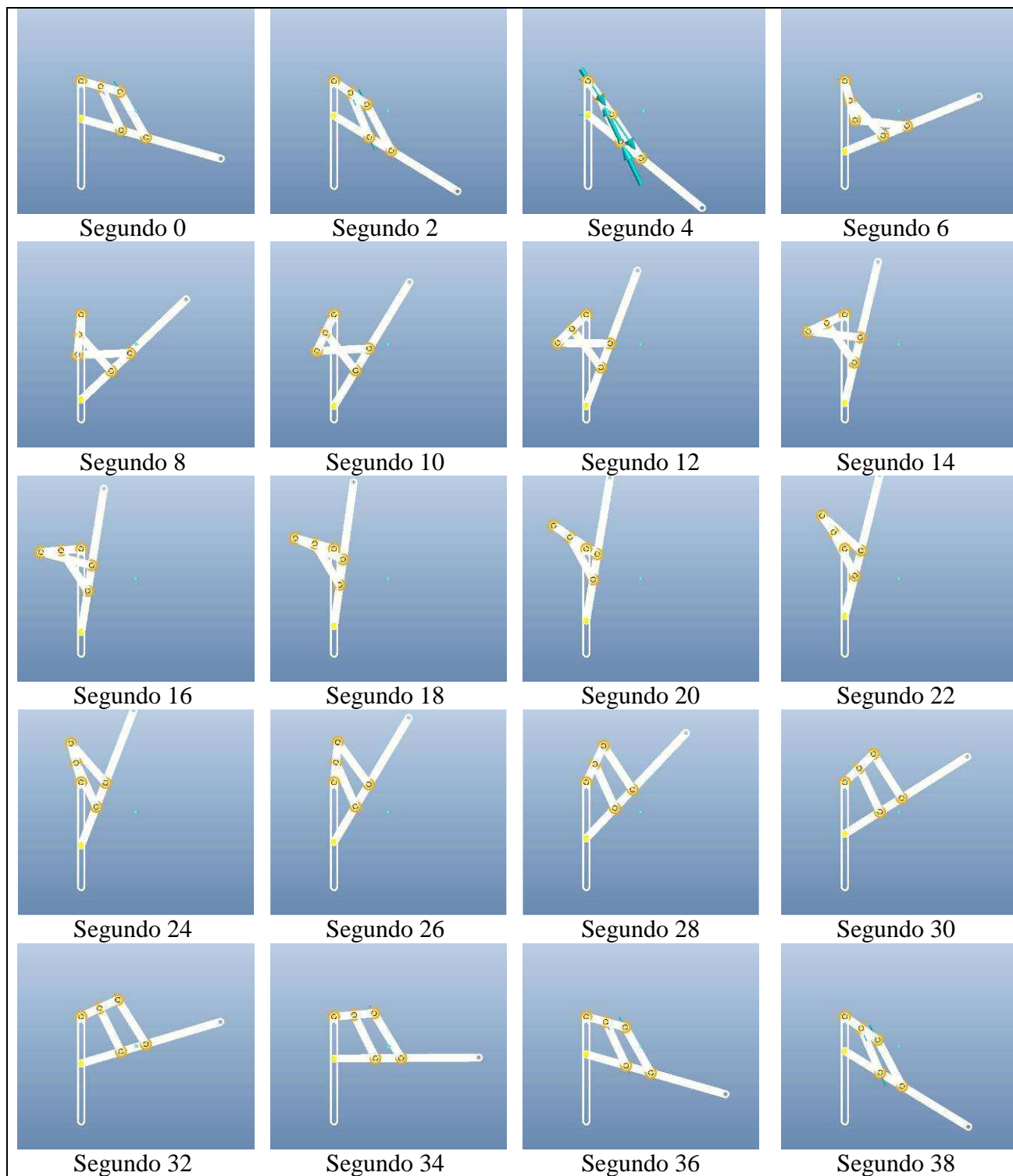


Ilustración 112. Secuencia del movimiento del Mecanismo5.

Obsérvese en la ilustración 112 como el momento dinámicamente más crítico ocurre en el **segundo 4**, que es prácticamente el único momento en el que aparecen reacciones en el mecanismo. Es chocante ver que una vez superado el esfuerzo de elevar la carga en el mecanismo no se generen esfuerzos para mantener la carga elevada o para descender de forma controlada. Esto apoya la teoría que anteriormente hizo descartar el mecanismo por ser excesivamente brusco.

8.6 Resumen de datos y selección de mecanismos.

En esta sección se realizará un resumen de los datos dinámicos más relevantes, de forma que el lector pueda hacer una comparación rápida entre los puntos fuertes y débiles de cada mecanismo. Se hablará principalmente de las reacciones máximas y mínimas en cada punto y los instantes críticos de cada mecanismo. Estos datos se recogen en la tabla 8.16 de este capítulo.

Posteriormente se retomará la parte de selección de mecanismos. Para ello se presentará un breve recordatorio del análisis cinemático, tras el cual se podrá llegar a una selección definitiva basada en los datos dinámicos obtenidos.

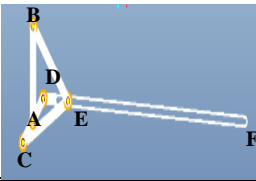
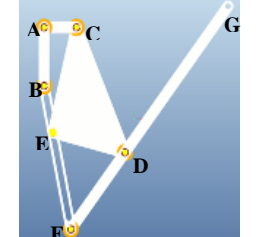
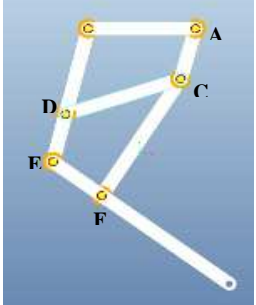
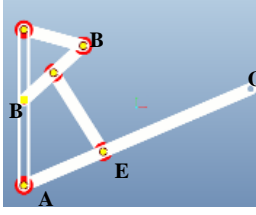
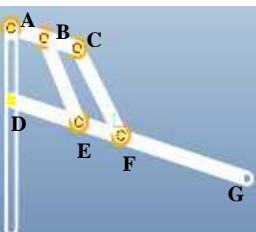
MECANISMO		Reacciones (N, kg·m/s ²)							Instante Crítico (seg.)
			A	B	C	D	E	F	
1		Máx	1063,41	1135,15	884,32	694,17	694,01	-	4
		Mín	285,93	284,05	138,02	143,50	143,47	-	20-25
2		Máx	1116,95	1063,77	1116,81	1368,73	1702,78	1281,19	8
		Mín	57,93	112,72	58,17	106,93	116,81	20,19	12-30
3		Máx	425,37	322,79	425,11	301,01	296,00	391,91	9 y 22
		Mín	181,47	79,93	181,21	11,98	190,49	279,87	16 y 30-35
4		Máx	315,62	315,38	507,34	234,79	507,17	471,71	6
		Mín	110,60	110,34	108,87	0,16	108,52	34,85	24
5		Máx	687,63	2500,28	2831,78	680,04	2500,58	2831,48	4
		Mín	112,14	7,67	0,59	46,88	7,36	0,59	8-30

Tabla 8.16. Resumen de los datos del análisis dinámico.

A continuación se presenta un breve resumen del contenido descrito en el apartado resumen del estudio cinemático. Los mecanismo 2 y 5 se excluyeron por presentar un movimiento poco controlado y con un carácter brusco. El mecanismo 4 presenta recorridos más cortos que otros mecanismos. Por tanto, **los mecanismos 1 y 3 son los que más se ajustan a los parámetros de selección** que marca la tarea de pick & place escogida. En la tabla 8.17 se presentan las variables cinemáticas que afectan a los mecanismos seleccionados.

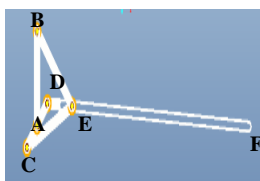
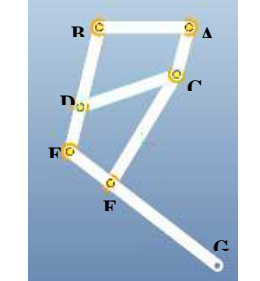
MECANISMO		x máx.	x mín.	h máx.	h mín.	X	Y	a	b	v máx	a máx
1		742,78	493,04	353,91	-86,84	249,74	440,75	506,59	156,72	79,27	22,67
3		404,13	88,43	-1,18	-419,57	315,7	418,39	524,13	300,75	69,53	17,07

Tabla 8.17. Resumen de los datos del análisis cinemático.

- **Mecanismo 1:** El mecanismo 1 realiza un movimiento bastante controlado con una velocidad y aceleración sin cambios bruscos. El máximo impulso se reparte principalmente en el recorrido de subida. Es el mecanismo que obtiene mayores alturas y longitudes en x en relación con el punto de referencia, que siempre está en el centro de masas del eslabón fijo. En cuanto al recorrido (X,Y) se puede considerar que está limitado en el eje X, obteniendo el 2º recorrido más largo en el eje Y.
- **Mecanismo 3:** En esta ocasión se presenta un mecanismo con un movimiento muy constante, sin variaciones importantes de velocidad y aceleración pero con un buen impulso en la zona alta de su trayectoria. La característica de este mecanismo es que realiza toda la curva de trayectoria por debajo del punto de referencia (todos los datos de posición en Y son negativos). Tiene unos parámetros de recorrido en los ejes X e Y que cumplen con las condiciones buscadas en las tareas típicas de pick & place.

El análisis dinámico muestra que, para la misma sollicitación, **en el mecanismo 1 las reacciones prácticamente doblan en todos los puntos las reacciones que se generan en el mecanismo 3**. En cuanto al instante crítico, el mecanismo 3 realiza una progresión de mayor duración en el tiempo, por lo que se deduce que el mecanismo 3 tiene una **progresión más gradual**. Un dato negativo para el mecanismo 3 es que presenta dos zonas críticas, la segunda menor que la primera. Sin embargo, si el mecanismo es capaz de soportar el primero de los esfuerzos no tendrá problema para soportar el segundo pico de esfuerzos. Además el par motor necesario para mover el mecanismo es menor en el caso del mecanismo 3. Por todo ello, el mecanismo seleccionado como óptimo para la función de pick & place que se contempla en este proyecto es el **MECANISMO 3** con un par motor de al menos **32899N·mm**.

CAPITULO 9. Análisis Energético de Mecanismos.

En los capítulos anteriores se han realizado los análisis cinemáticos y dinámicos correspondientes a todos los mecanismos propuestos en este proyecto para la realización de la tarea de pick & place. Dichos estudios se han llevado a cabo generando el movimiento deseado mediante la simulación de un motor cinemático. Hasta ahora, en todos los análisis este motor giraba a velocidad constante. Esta es la razón por la cual los resultados cinemáticos en los capítulos 7 y 8 eran exactamente iguales.

Cuando se impone a un motor que gire a velocidad constante, éste realizará el giro independientemente de la carga que tenga que soportar. En la realidad, los mecanismos se dimensionan a partir del par que tiene que soportar el motor o de la energía que dicho motor tendrá que suministrar. Además, los motores reales tienen una fase de puesta en marcha en la cual la velocidad no es constante.

Para dar mayor realismo a este estudio, en este análisis se ha realizado la simulación mediante un motor de giro NO constante. En el caso que se va a estudiar a continuación la fase de arranque dura 5 segundos. En ella el motor iniciará su marcha desde 0rad/s a 0,1745rad/s. Posteriormente, para que el análisis cubra el ciclo completo se ha establecido una duración de 34 segundos en los que el motor, una vez arrancado, operará a velocidad constante. Dicha velocidad se establecerá, como en los casos anteriores, en 0,1745rad/s. Por último, se realizará la parada del motor que tendrá una duración igual a la de la fase de arranque, completando así 45 segundos en los que el mecanismo completará un ciclo de movimiento completo. En esta última fase la velocidad decrecerá desde 0,1745rad/s a 0rad/s. La versión de PRO-E empleada en este proyecto no trabaja con el S.I. de medida, por lo que los datos a introducir se convertirán a %s ($0,1745\text{rad/s} = 10\text{°/s}$).

Para definir un motor cinemático de velocidad NO constante en PRO-E se procede de la misma forma que se indica en el CAPÍTULO 6 del presente documento pero con una ligera variación. En el módulo PRO/MECHANISM, al seleccionar la velocidad del motor en la pestaña **“Perfil”** del cuadro de diálogo, la aplicación permite escoger entre varias opciones (ver ilustración 113). En este cuadro de diálogo se pueden seleccionar varias curvas predefinidas o crear una mediante la opción **DEFINIDO POR EL USUARIO**. En el caso de estudio se ha preferido generar una curva personalizada para adecuarla a las curvas típicas de arranque de los motores destinados a este tipo de aplicación.

Para definir la curva, se debe seleccionar, por un lado, el dominio de la variable y, por otro, la ecuación que define la función en cada parte del dominio. De esta forma podemos definir el aspecto que presentará la curva de arranque. La variable que se va a manejar es el tiempo (t).

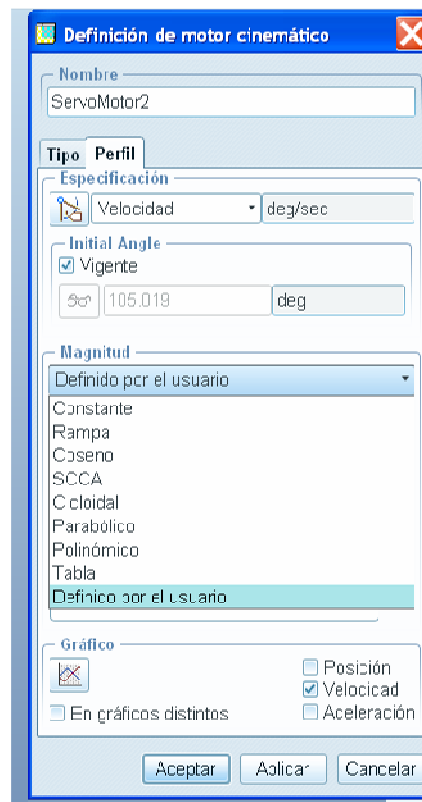


Ilustración 113. Cuadro de diálogo de motor.

El primer dominio se definirá como $0 \leq t < 5$. En dicho dominio la curva de velocidad se corresponderá con el arranque y estará definida por la ecuación $v = 2t$.

El segundo dominio se corresponde con la curva a velocidad constante. Se define el dominio de la variable como $5 \leq t \leq 39$. Como se ha especificado antes, en este caso la curva no depende del tiempo y por tanto se definirá con la ecuación $v = 10$.

Por último, queda definir el tercer dominio, que se corresponde con la curva de frenado en donde el mecanismo detendrá su movimiento. Esta curva es exactamente igual a la de arranque pero cambiada de signo. El dominio en el que actúa la variable se define de la siguiente manera: $39 < t \leq 44$. En este caso la ecuación comienza en $t = 39$ por lo que la ecuación se definirá como $v = 10 - 2(t-39)$.

Una vez definida la ecuación general, se puede visualizar gráficamente el conjunto. En el caso de estudio se ha generado una curva con forma trapezoidal en la que todas las fases presentan un aspecto lineal. Para una mejor comprensión de lo descrito se adjunta la ilustración 114, que además muestra una captura del proceso a realizar en el programa PRO-E.

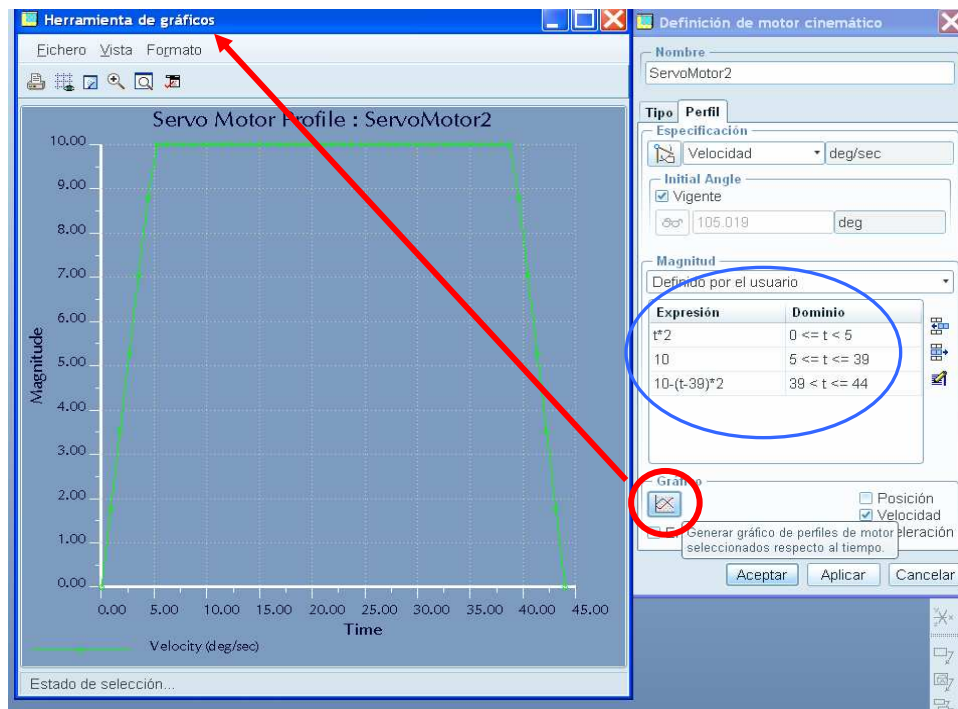


Ilustración 114. Velocidad de motor definida por el usuario.

A continuación se procede a realizar el informe de los resultados obtenidos en cada mecanismo. Como viene siendo habitual, en este informe se recogerá la tabla de datos acompañada de los resultados gráficos que ilustran lo que ocurre durante todo el movimiento del mecanismo.

9.1 Análisis energético del Mecanismo 1.

Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)	Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)
0	0	23	8,848
1	0,861	24	11,082
2	3,655	25	14,207
3	8,965	26	17,367
4	24,153	27	19,310
5	59,909	28	21,352
6	74,896	29	23,536
7	68,224	30	24,126
8	47,227	31	23,462
9	27,248	32	23,030
10	16,094	33	20,811
11	12,402	34	18,123
12	11,381	35	14,848
13	11,512	36	10,362
14	12,610	37	6,881
15	12,155	38	7,476
16	11,270	39	14,327
17	9,220	40	19,577
18	5,900	41	18,021
19	4,277	42	10,277
20	4,997	43	4,220
21	6,000	44	2,256
22	6,626	-	-

Tabla 9.1. Resultados del análisis energético.

En la ilustración 115 se presentan los resultados gráficos del análisis energético para el mecanismo 1. Los momentos de mayor consumo energético son los instantes iniciales. Dichos instantes se corresponden no sólo con el inicio de la marcha, sino con el momento en el que mayores esfuerzos se generan en el mecanismo. Por tanto, es el momento en el que el motor debe proporcionar mayor par para mantener el giro a la velocidad indicada. Si se localiza dicho instante en la trayectoria del mecanismo, encontramos que el máximo de energía se debe proporcionar justo en la mitad de la trayectoria ascendente, transcurridos 6 segundos desde el inicio de la marcha.

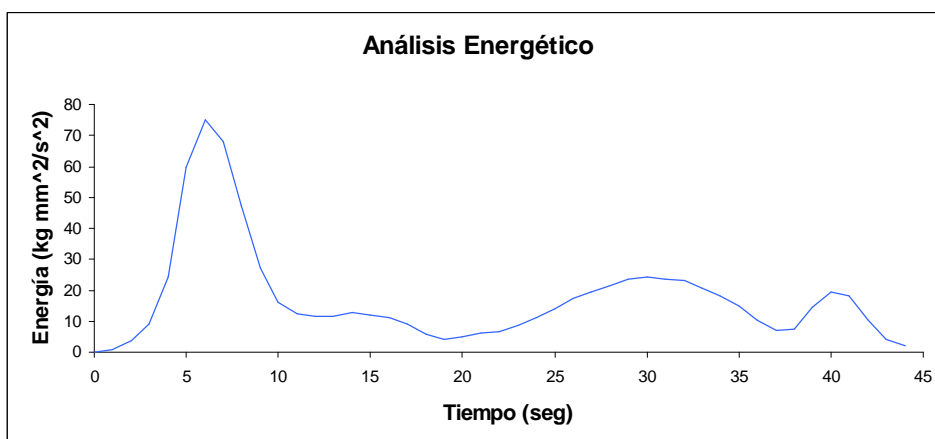


Ilustración 115. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 1.

Tras alcanzar el máximo, la energía a proporcionar es cada vez menor, hasta localizar un cambio de tendencia en el instante 10, momento en el que se inicia la transición de trayectoria ascendente a descendente.

A partir de este momento, se mantiene un aporte energético constante que dura unos 5 segundos. Después de transcurrido ese tiempo, la energía se reduce hasta alcanzar un mínimo energético muy próximo a 0 en el segundo 20. En este instante se ha finalizado la transición de trayectoria ascendente a descendente y el brazo comienza a descender.

En el movimiento descendente se observa que se produce un aumento de la energía que el motor ha de suministrar al sistema. Este aumento presenta dos máximos. El primero se produce en la mitad de la fase del movimiento de bajada. Cuando el brazo está apunto de comenzar la transición para iniciar de nuevo el movimiento ascendente se observa un pequeño descenso de la energía a aportar.

Por último, la gráfica de la ilustración 115 muestra un segundo máximo en el instante 40, en el momento en el que el mecanismo vuelve a iniciar el ascenso.

Como conclusión, el momento energéticamente más crítico se produce a los 6 segundos de iniciar la marcha y tiene un valor de $74,896 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2/\text{s}^2$ (o lo que es lo mismo, $7,49\cdot 10^{-5}$ Watios). Este es el valor máximo que debe aportar el motor seleccionado.

En la tabla 9.2 se presenta un resumen de los datos de máximos y mínimos del movimiento para representar los momentos más representativos del análisis.

	Máximo absoluto	Mínimo absoluto	Otros máximos			Otros mínimos		
Energía ($\text{mm}^2\cdot\text{kg}/\text{s}^2$)	74,896	4,277	12,610	24,126	19,577	11,381	4,277	6,881
Instante (seg)	6	19	14	30	40	12	19	34

Tabla 9.2. Momentos representativos del análisis energético.

9.2 Análisis energético del Mecanismo 2.

Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)	Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)
0	-	23	10,289
1	3,312	24	11,140
2	7,930	25	12,754
3	14,963	26	13,626
4	23,439	27	15,356
5	30,106	28	16,742
6	23,312	29	18,533
7	15,009	30	20,630
8	8,068	31	26,204
9	13,158	32	29,265
10	79,648	33	32,319
11	281,293	34	36,175
12	499,702	35	37,227
13	435,327	36	40,269
14	236,398	37	41,688
15	104,701	38	41,115
16	43,683	39	38,911
17	19,543	40	24,317
18	10,362	41	13,048
19	8,916	42	5,795
20	9,064	43	3,733
21	9,101	44	2,256
22	11,512	-	-

Tabla 9.3. Resultados del análisis energético.

La ilustración 116 recoge los resultados gráficos del análisis energético del mecanismo 2. Se aprecia claramente que los datos recogidos en la tabla 9.3 no tienen gran variación durante el recorrido. El motor prácticamente no está solicitado durante la trayectoria del brazo. Es sólo entre los instantes 10 a 18 cuando el motor se ve solicitado.

Al iniciar la marcha, se observa que el motor sufre un ligero ascenso progresivo de la energía a aportar alcanzando un máximo en el instante en el que el motor proporciona una velocidad de giro constante (5 sguendos). Estos instantes se corresponden con el descenso del brazo hasta el punto inferior.

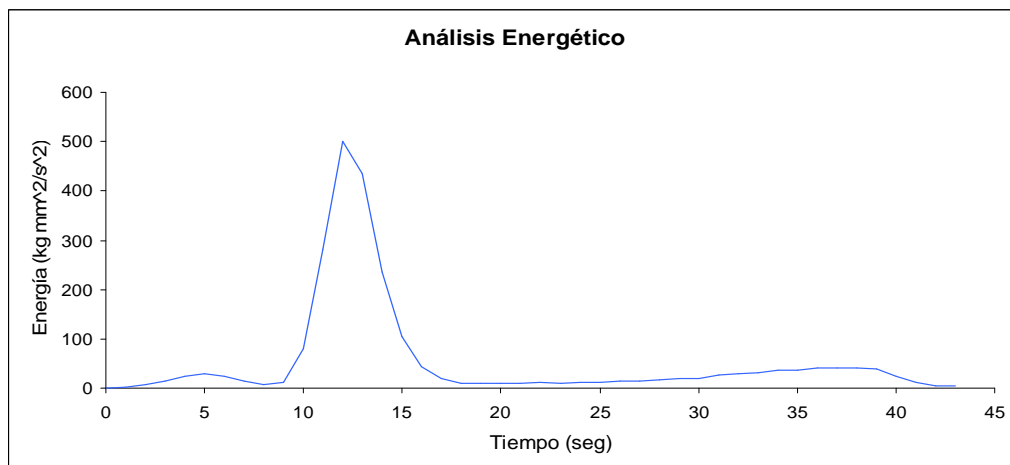


Ilustración 116. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 2.

A partir de ahí, se mantiene constante hasta el segundo 10, momento en el cual la sollicitación del motor comienza a verse reflejada y además el brazo comienza su movimiento de ascenso y alcanza su máximo en el segundo 12 (que coincide con la mitad de la trayectoria ascendente)

Tras alcanzar el máximo, la energía a proporcionar es cada vez menor, hasta localizar un cambio de tendencia en el instante 16, momento en el que se inicia la transición de trayectoria ascendente a descendente.

A partir de este momento, se mantiene un aporte energético constante aunque de forma creciente. Después de transcurridos 23 segundos a partir del cambio de tendencia se localiza de nuevo un máximo. Este transcurso de tiempo abarca todo el trayecto de descenso del brazo.

Posteriormente, el mecanismo comienza a reducir su velocidad hasta detenerse coincidiendo con el descenso de la energía hasta el valor 0. Es entonces cuando el mecanismo ha completado la fase de desaceleración.

Como conclusión, el momento energéticamente más crítico se produce a los 12 segundos de iniciar la marcha y tiene un valor de $499,702 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2/\text{s}^2$ (o lo que es lo mismo, $4,99\cdot 10^{-4}$ Watios). Este es el valor máximo que debe aportar el motor seleccionado.

En la tabla 9.4 se presenta un resumen de los datos de máximos y mínimos del movimiento para representar los momentos más representativos del análisis.

	Máximo absoluto	Mínimo absoluto	Otros máximos		Otros mínimos
Energía ($\text{mm}^2\cdot\text{kg}/\text{s}^2$)	499,702	8,068	30,106	41,688	8,916
Instante (seg)	12	8	5	37	19

Tabla 9.4. Momentos representativos del análisis energético.

9.3 Análisis energético del Mecanismo 3.

Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)	Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)
0	-	23	29,318
1	2,122	24	31,448
2	7,249	25	32,458
3	13,089	26	33,381
4	20,124	27	34,050
5	25,615	28	32,662
6	18,515	29	31,727
7	13,704	30	31,709
8	22,418	31	31,687
9	63,279	32	31,861
10	138,325	33	32,917
11	186,743	34	34,165
12	165,973	35	35,725
13	114,818	36	37,390
14	71,465	37	38,024
15	42,974	38	37,077
16	26,522	39	35,040
17	19,212	40	20,775
18	17,301	41	9,892
19	18,196	42	4,202
20	20,467	43	2,246
21	23,516	44	1,579
22	26,265	-	-

Tabla 9.5. Resultados del análisis energético.

En la ilustración 117 se puede observar la curva energética del motor. Sigue con la tendencia marcada hasta ahora que es un aumento de la energía moderado hasta llegar al momento en el que el motor pasa a régimen constante y un máximo absoluto en los instantes posteriores, cuando el mecanismo se encuentra en su momento crítico.

Es interesante recordar que el mecanismo que se está analizando presentaba 2 momentos dinámicamente críticos en los que las reacciones eran máximas. Uno se encontraba en la mitad superior de la trayectoria ascendente (en los puntos superiores del mecanismo, donde se encuentra el motor) y otro, en todo caso menor que el anterior, en la mitad descendente del movimiento (localizado en los puntos inferiores del mecanismo).

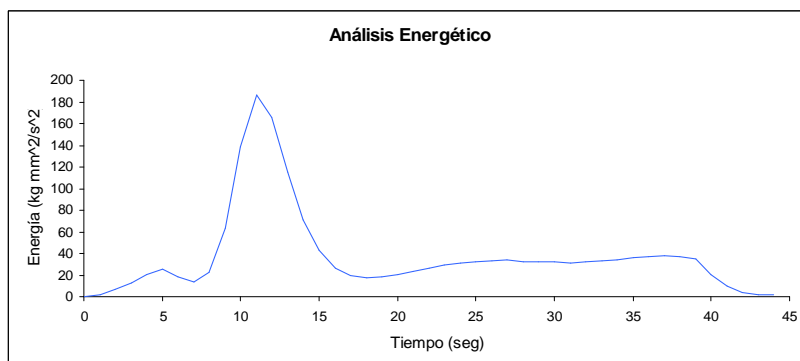


Ilustración 117. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 3.

Como se ha comentado previamente, la curva energética presenta un ligero ascenso que va desde el inicio de la marcha, en estado de puesta en marcha, hasta encontrar su máximo hacia el segundo 5, que es el segundo en el que se produce el cambio a régimen constante.

Posteriormente se produce un descenso energético que finaliza con un cambio brusco en el segundo 8. A partir de este momento, llegando a la mitad del movimiento ascendente, se produce un aumento importante de la energía a aportar alcanzando el máximo en el instante 11.

Tras alcanzar el máximo, la energía va disminuyendo de forma rápida hasta volver a alcanzar un nuevo mínimo en el segundo 18, que es el instante en el que se inicia la trayectoria de descenso.

El movimiento de descenso del brazo se caracteriza por un aumento progresivo de la energía a aportar por el motor, que prácticamente sigue la tendencia ascendente hasta alcanzar un máximo en el segundo 37 (entre medias existe otro máximo que carece de importancia).

Tras este último máximo, en el que el mecanismo está en la posición inferior de la trayectoria de descenso, el mecanismo inicia su fase de desaceleración o fase de detención en la cual el mecanismo reduce progresivamente su aporte energético y finalmente se detiene en el segundo 44 una vez se ha completado la transición de movimiento de descenso a movimiento de ascenso.

Como conclusión, el momento energéticamente más crítico se produce a los 11 segundos de iniciar la marcha y tiene un valor de $186,743 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2/\text{s}^2$ (o lo que es lo mismo, $1,86\cdot 10^{-4}$ Watios). Este es el valor máximo que debe aportar el motor seleccionado.

En la tabla 9.6 se presenta un resumen de los datos de máximos y mínimos del movimiento para representar los momentos más representativos del análisis.

	Máximo absoluto	Mínimo absoluto	Otros máximos			Otros mínimos		
Energía ($\text{mm}^2\text{kg/s}^2$)	186,743	13,704	25,615	34,050	38,024	17,301	31,687	-
Instante (seg)	11	7	5	27	37	18	31	-

Tabla 9.6. Momentos representativos del análisis energético.

9.4 Análisis energético del Mecanismo 4.

Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)	Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)
0	-	23	12,026
1	2,267	24	9,992
2	8,785	25	8,419
3	17,926	26	6,976
4	26,594	27	6,217
5	30,681	28	8,673
6	19,087	29	15,501
7	9,911	30	22,834
8	8,513	31	28,006
9	17,978	32	31,135
10	33,233	33	33,337
11	43,086	34	35,347
12	43,345	35	37,944
13	39,369	36	41,408
14	35,922	37	44,965
15	33,932	38	46,940
16	32,760	39	45,613
17	31,728	40	26,778
18	29,721	41	13,495
19	26,590	42	5,845
20	22,691	43	2,266
21	18,615	44	1,234
22	14,904	-	-

Tabla 9.7. Resultados del análisis energético.

En la ilustración 118 se puede observar la curva energética del motor. En este caso, la curva generada no sigue un orden lógico de comportamiento y presenta 3 máximos localizados.

Se observa que al comenzar la marcha, la energía solicitada comienza a crecer hasta el instante 5 en el que la velocidad pasa a régimen constante. En dicho punto se localiza el primero de los máximos que se generan en esta curva. Tras ello la energía a aportar comienza a descender. Esta fase coincide con un movimiento de descenso del brazo hasta llegar al punto inferior de la trayectoria en el segundo 8, en el que se produce un cambio de tendencia y se vuelve a demandar mayor energía.

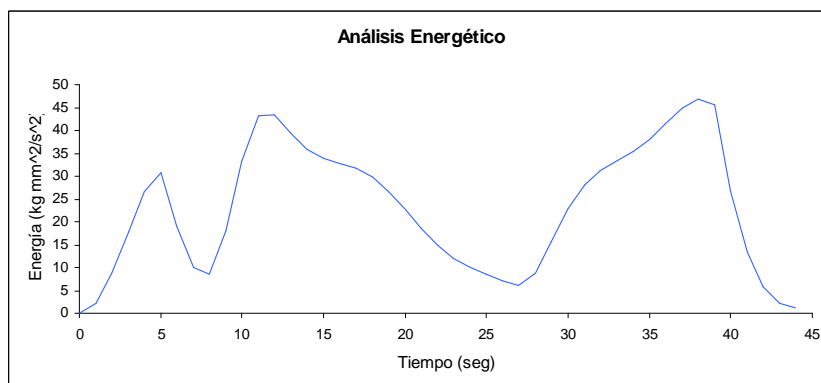


Ilustración 118. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 4.

A partir del segundo 8, la energía necesaria va creciendo hasta encontrar su máximo en el instante 12, momento en el que el mecanismo se encuentra elevando la carga.

Posteriormente se produce un descenso energético que finaliza con un mínimo en el segundo 27. En este instante, el mecanismo se encuentra en su posición más elevada y comienza a realizar la transición de movimiento ascendente a descendente.

A medida que el brazo comienza a descender la energía a aportar crece hasta que en el segundo 38 se modifica esa tendencia. El mecanismo se encuentra aproximadamente en la mitad de su carrera de descenso.

Tras este último máximo, se inicia la fase de detención del mecanismo. En esta fase la energía comienza a reducir su valor de forma brusca hasta que en el instante 45 el mecanismo

Como conclusión, el momento energéticamente más crítico se produce a los 11 segundos de iniciar la marcha y tiene un valor de $46,940 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2/\text{s}^2$ (o lo que es lo mismo, $4,694\cdot 10^{-5}$ Watios). Este es el valor máximo que debe aportar el motor seleccionado.

En la tabla 9.8 se presenta un resumen de los datos de máximos y mínimos del movimiento para representar los momentos más representativos del análisis.

	Máximo absoluto	Mínimo absoluto	Otros máximos			Otros mínimos		
Energía ($\text{mm}^2\cdot\text{kg}/\text{s}^2$)	46,940	6,217	30,681	43,345	-	8,513	-	-
Instante (seg)	38	27	5	12	-	8	-	-

Tabla 9.8. Momentos representativos del análisis energético.

9.5 Análisis energético del Mecanismo 5.

Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)	Tiempo (seg)	Energía (Kg·m ² /s ²)
0	-	23	10,507
1	3,477	24	11,473
2	7,486	25	14,120
3	15,609	26	15,911
4	24,656	27	19,899
5	29,841	28	23,598
6	12,075	29	25,180
7	979,005	30	29,543
8	75,958	31	29,930
9	50,433	32	32,456
10	42,003	33	33,342
11	35,878	34	34,011
12	32,593	35	34,814
13	26,614	36	35,487
14	24,024	37	37,258
15	19,791	38	38,469
16	15,838	39	38,059
17	14,766	40	23,819
18	12,023	41	13,554
19	11,763	42	5,040
20	10,283	43	3,684
21	10,349	44	1,393
22	9,950	-	-

Tabla 9.9. Resultados del análisis energético.

En la ilustración 119 se puede observar la curva energética del motor. La curva se corresponde con lo esperado para este mecanismo en el que, según el análisis dinámico, sólo presentaba sollicitación en un momento puntual del recorrido. Es por eso que en el resto apenas se aprecia demanda energética.

La curva energética presenta un ligero ascenso que va desde el inicio de la marcha, en estado de puesta en marcha, hasta encontrar su máximo hacia el segundo 5, que es el segundo en el que se produce el cambio a régimen constante.

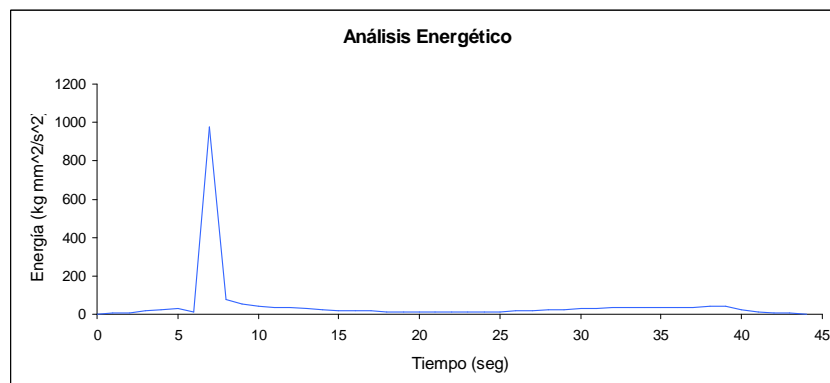


Ilustración 119. Gráfica del análisis energético del Mecanismo 5.

Posteriormente se produce un descenso energético que finaliza con un cambio brusco en el segundo 6. A partir de este momento, llegando a la mitad del movimiento ascendente, se produce un aumento importante de la energía a aportar alcanzando el máximo en el instante 7.

Como en el resto de los análisis para este mecanismo, los cambios ocurren de una forma muy rápida. El momento de transición entre el máximo de sollicitación y el mínimo sólo ocupa 1 segundo y el resto del tiempo se mantiene prácticamente constante en niveles muy bajos.

Sólo se aprecia un nuevo máximo llegando a la zona de transición en el descenso, aproximadamente en el segundo 38. Sin embargo estos valores son prácticamente nulos comparados con el periodo de 2 segundos en el que se produce el máximo absoluto.

Como conclusión, el mecanismo sigue la tendencia brusca que le caracteriza localizándose el momento energéticamente más crítico a los 7 segundos de iniciar la marcha. En este instante, el valor energético es de $979,005 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2/\text{s}^2$ (o lo que es lo mismo, $9,79\cdot 10^{-4}$ Watios). Este es el valor máximo que debe aportar el motor seleccionado.

En la tabla 9.10 se presenta un resumen de los datos de máximos y mínimos del movimiento para representar los momentos más representativos del análisis.

	Máximo absoluto	Mínimo absoluto	Otros máximos			Otros mínimos		
Energía ($\text{mm}^2\cdot\text{kg}/\text{s}^2$)	979,005	9,950	29,841	38,469	-	12,075	-	-
Instante (seg)	7	22	5	38	-	6	-	-

Tabla 9.10. Momentos representativos del análisis energético.

CAPITULO 10. Introducción a la optimización con PRO MECHANICA.

En el presente capítulo se va a realizar una pequeña introducción al módulo PRO MECHANICA, integrado en el programa PRO-E. Para no extender en exceso el proyecto se va a seleccionar tan sólo un eslabón al que se le realizará la simulación de elementos finitos (FEM) para determinar los esfuerzos y desplazamientos originados por las condiciones impuestas.

Lo ideal sería realizar el mismo análisis para todo el mecanismo, pero eso requiere de una mayor dedicación, de la creación de elementos de conexión y otras herramientas más avanzadas que se escapan del objetivo del proyecto.

El desarrollo del capítulo será un procedimiento autoguiado que permitirá conocer el módulo utilizado y, de esta forma, continuar en futuros desarrollos con esta aplicación así como extender el desarrollo empleado en este capítulo al resto de los mecanismos del proyecto. Esto requerirá de una mayor profundización en la aplicación y de una mayor dedicación.

La forma de trabajar con PRO MECHANICA es bastante intuitiva si se ha tenido contacto con aplicaciones similares de análisis FEM tales como ANSYS u otras aplicaciones del sector. Una de las ventajas que aporta PRO MECHANICA frente a otras aplicaciones es que tiene un sistema de automallado denominado AUTOGEM.

Lo primero que se debe realizar es la selección del material. En este aspecto, la aplicación permite seleccionar de una lista el material deseado o crear un nuevo material que se ajuste mejor a las exigencias de diseño.

En segundo lugar, para poder realizar un análisis se deben imponer restricciones en el sistema analizado. Las restricciones limitan tanto la traslación como la rotación o giro.

Tras ello, el tercer paso es imponer las solicitaciones que actuarán en el sistema analizado. Pueden escogerse tanto cargas puntuales como cargas distribuidas en un área, una arista, etc.

Tras ello, pasaríamos a escoger el análisis deseado de entre los existentes en la aplicación (Modal, Fatiga, Standard, etc.).

Una vez completado el análisis, el programa permitirá visualizar gráficamente los resultados deseados en una ventana externa, extraerlos o realizar nuevos análisis partiendo de los resultados obtenidos. Es el caso del análisis de optimización, que para poder realizarlo es necesario correr un análisis STANDARD???

A continuación detallaremos el proceso a seguir para llevar a cabo todos los pasos necesarios para poder crear los análisis deseados y obtener los resultados. Se utilizará uno de los eslabones que actúan como brazo mecánico para realizar el mini-tutorial y se presentarán los resultados al final del capítulo.

10.1 Definición del análisis.

El primer paso a realizar para comenzar el análisis TAL es cargar la pieza que se desea analizar. En el presente caso se ha seleccionado el eslabón EFG del mecanismo 3. Para ello, tras iniciar el programa PRO-E navegaremos por el menú hasta la ruta en donde se encuentre la pieza deseada y se abrirá como si se fuese a continuar diseñando, se fuese a empezar a ensamblar o bien se fuese a realizar cualquier otra operación disponible en PRO-E (ilustración 120).

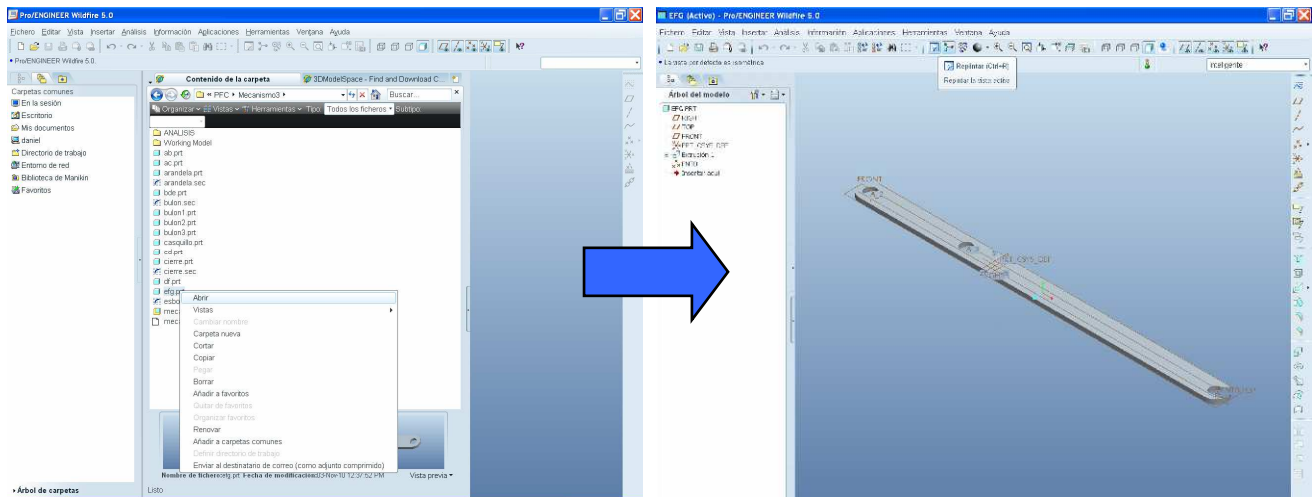


Ilustración 120. Abrir pieza en PRO-E.


Una vez la pieza ha sido abierta en el programa PRO-E se puede navegar por el menú de la parte superior de la pantalla hasta seleccionar el comando **“Aplicaciones”**. El menú pone a disposición del usuario diferentes aplicaciones de diseño y análisis (estándar, chapa, soldadura, datos heredados, mecánica, plastic advisor, etc.). Para comenzar a utilizar la aplicación PRO MECHANICA se debe seleccionar la opción **“Mechanica”** del menú “Aplicaciones”. Entonces aparecerá una ventana bajo el nombre de **“Mechanica Model Setup”** (ilustración 121) en la que se podrá escoger el tipo de análisis deseado (“Structure” o “Termal”) y las condiciones del análisis (“Bonded”, “Free”, “Contact”). En el caso de estudio se dejarán los parámetros por defecto, es decir, **“Structure”** para el tipo de análisis y **“Bonded”** para las condiciones del análisis.



Ilustración 121. Mechanica Model Setup.

En este punto, el entorno de PRO-E habrá cambiado y en la barra de herramientas que aparece en la parte derecha de la pantalla aparecerán unos comandos que no tienen nada que ver con los que se utilizaban para crear la geometría, el esbozo, etc. En este caso, los comandos son exclusivos de PRO MECHANICA y permiten imponer cargas, seleccionar materiales, crear conexiones, crear restricciones, realizar soldaduras, obtener medidas y otras opciones de menor alcance.

PRO MECHANICA no obliga a realizar el análisis mediante una secuencia rígida, sino que permite que las condiciones puedan ser elegidas siguiendo el orden que al usuario le parezca más interesante. Por ejemplo, el usuario puede empezar imponiendo cargas y dejar la selección del material para lo último.

El primer punto del análisis será la **“Selección del material”**. El material seleccionado para las piezas de los diferentes mecanismos es aluminio de densidad $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$. Para asignar un tipo de material a una pieza se selecciona el comando **“Materiales”**  de la parte derecha de la pantalla. Aparecerá un menú con los materiales existentes en la biblioteca de PRO-E (ilustración 122).

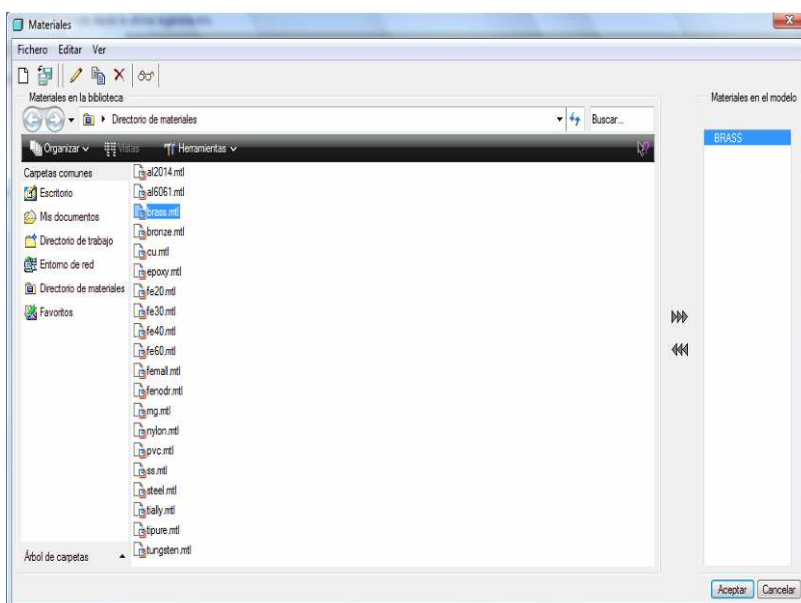


Ilustración 122. Biblioteca de Materiales de PRO-E.

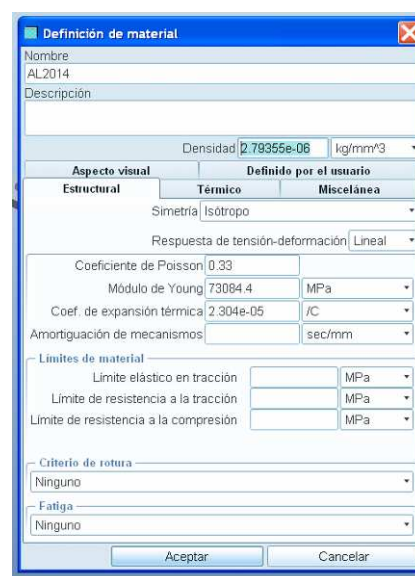








Ilustración 123. Propiedades del material.

Se elige el material que se desee y se agrega en la siguiente columna haciendo click en . Se pueden seleccionar varios materiales, ya que esta ventana es para preseleccionar dichos materiales y ver sus propiedades. Cabe destacar que Pro/MECHANICA ofrece la oportunidad de crear nuevos materiales.

Haciendo click en el icono  se definen las propiedades estructurales y térmicas del material, en esta ventana se encontraran datos de la densidad, conductividad térmica, se selecciona el criterio de falla, coeficiente de expansión térmica, etc (ilustración 123).

Luego se hace click en el comando **“Asignación de Materiales”**  para asignar el material final de la pieza, que en nuestro caso será **AL2014**. Las propiedades de este material pueden verse en la ilustración 123.

El siguiente paso a realizar es agregar las **“Restricciones del material”**. Las restricciones se definen para limitar el movimiento de la pieza al aplicársele la carga. Solo al definir las restricciones del modelo, se puede observar el efecto de las fuerzas. Las restricciones pueden ser para evitar movimiento de traslación y de rotación, cada una con sus tres componentes correspondientes a los ejes X, Y y Z. Para activar la caja de diálogos de las restricciones, se hace click en **“Restricciones”** . En el caso de estudio, el eslabón EFG consta de 2 taladros que servirán como unión a otros eslabones. Se realizará la idealización de que dichos taladros funcionarán como apoyos, es decir, la traslación estará restringida en los 3 ejes pero no existirá restricción en la rotación (ver ilustración 124)

Una vez creadas las restricciones deseadas, para que éstas realicen su función es necesario **“Imponer solicitaciones al sistema”**. Para especificar las cargas aplicadas, se hace click en **“Carga de Fuerza - Momento”**  (también existe la posibilidad de crear una carga distribuida mediante el comando “Carga de presión” ). En la caja de dialogo mostrada en la ilustración 125 se presenta la opción de colocar la fuerza en cualquiera de los ejes (X, Y y Z) y también que se pueden definir cargas de momento. Para el análisis a realizar se ha escogido una carga de 100 N en el eje Z. La carga se ha colocado en el punto central del taladro que sirve como referencia para tomar las medidas en los análisis realizados previamente (también pueden seleccionarse curvas y otros elementos para colocar la carga).

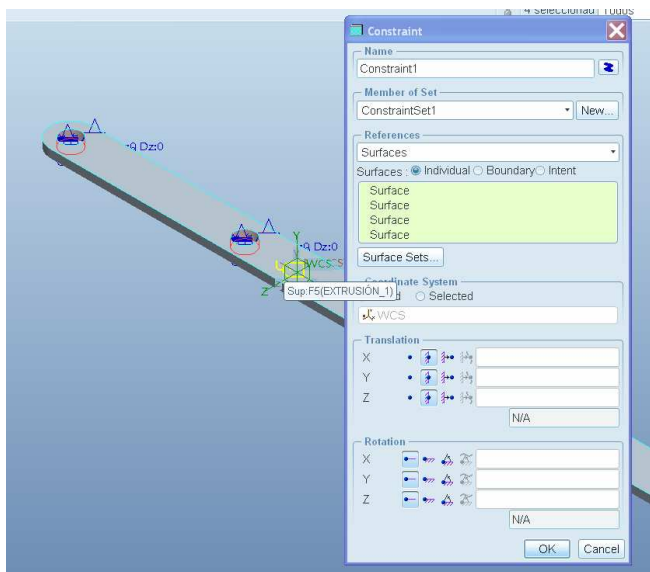


Ilustración 124. Restricciones del material.

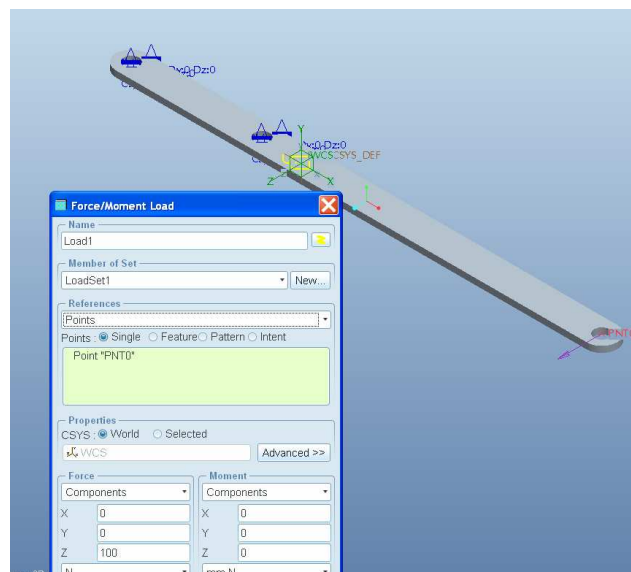




Ilustración 125. Selección y colocación de la carga.

Como se ha comentado previamente, el programa PRO-E cuenta con un sistema de generación automática de mallado. No obstante, es posible (aunque en el caso estudiado no se va a realizar) modificar el tamaño de cada elemento y otros aspectos que afectan al mallado. Para modificar o crear la malla se hace click en **“Control”** , para desplegar el menú de AutoGEM Control y en él se especifican las dimensiones del elemento. Luego se hace click en **“Crear Mallado”**  para generar el mallado.

Para concluir con el estudio, se debe escoger entre los distintos tipos de análisis que PRO MECHANICA pone a disposición del usuario. Estos son Estructurales (estáticos, modales, dinámicos, de fatiga) o Térmicos (transitorio o estacionario).

Para seleccionar el tipo de análisis deseado se hace click en **“Mechanica Analises/Studies”**. Al pinchar en el comando **“File”** se despliega un menú que permite seleccionar los análisis estructurales y térmicos mencionados anteriormente. Es necesario realizar uno de estos análisis antes de proceder a realizar un estudio de diseño (optimización, sensibilidad o standard). En el caso que nos ocupa se realizará un análisis estático (**“New Static”**). Se abrirá un cuadro de diálogo en el que se podrán escoger las restricciones y solicitaciones deseadas así como modificar las condiciones específicas del análisis (convergencia, salidas, exclusiones, etc.). El proceso de definición del análisis se muestra en la ilustración 126. Es importante cambiar la opción de la casilla **“Method”** a **“Multiple-Pass Adaptive”** para realizar una posterior optimización.

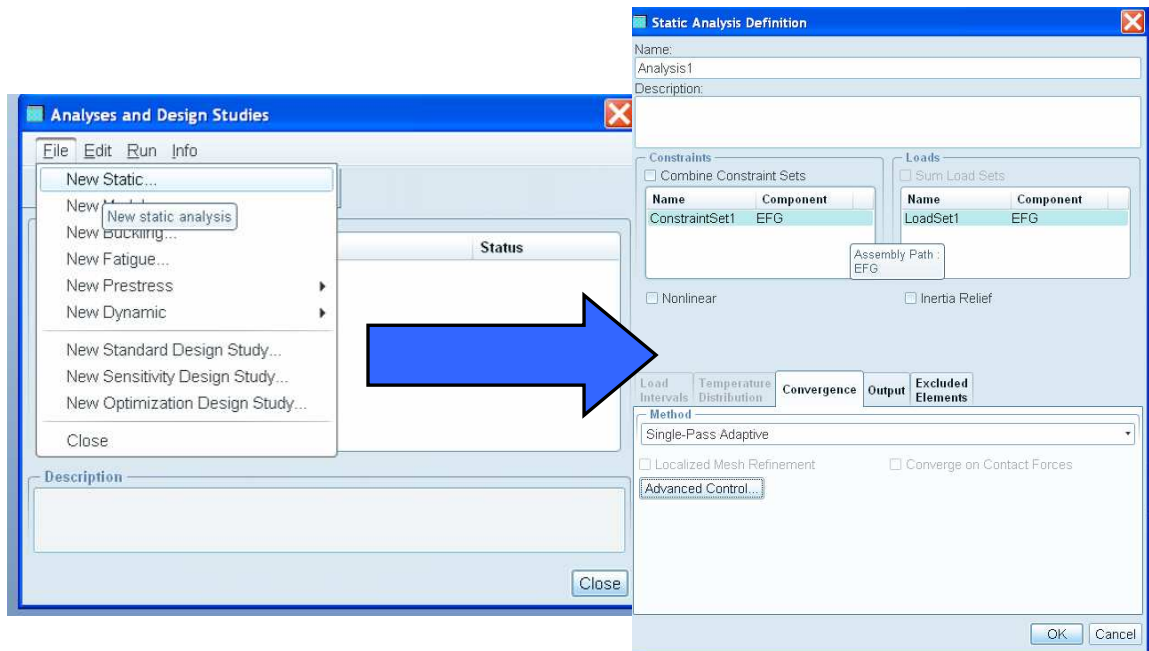


Ilustración 126. Definición del análisis estático.

Por último, para finalizar con el proceso se pulsa el botón **“Start Run”** y se espera a que el análisis finalice.

10.2 Extracción de resultados.

Una vez completado el análisis estático de forma satisfactoria, se puede proceder a visualizar los resultados obtenidos. Para ello, en la misma ventana del análisis se hace clic en **“Resultados”**. Aparecerá una nueva ventana en la que volviendo a pinchar sobre el mismo icono podremos seleccionar los resultados deseados (tensión de Von Mises, tensión máxima/mínima, desplazamientos, deformaciones máximas/mínimas, etc.). La ventana de selección de resultados puede verse en la ilustración 127.

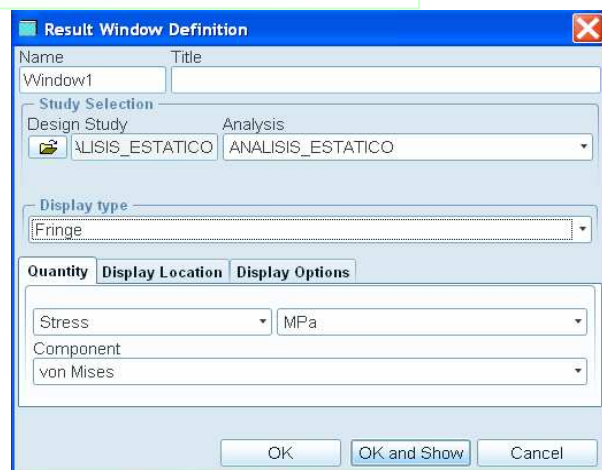


Ilustración 127. Ventana de selección de resultados.

Para el caso de estudio se van a seleccionar 3 medidas que serán la tensión de Von Misses (Mpa), el desplazamiento máximo (en mm) y la deformación máxima (que en el programa viene medida por colores y carece de unidades). En la ilustración 127 también puede observarse que los resultados pueden extraerse mediante distintas opciones. La primera, “Fringe” nos dará los resultados mediante un código de colores y permitirá superponer la deformada a la pieza original. La segunda, “Vectors” mostrará mediante vectores los resultados y utilizará también un código de colores para visualizar el resultado. La tercera, “Graph” sirve para extraer gráficas del resultado. Por último, la opción “Model” sirve para visualizar los resultados mediante un código de puntos que sería el indicativo de la medida.

Se ha considerado que la opción que más resultados aporta es **“Fringe”**, por lo que los resultados serán mostrados mediante esta opción. En la pestaña **“Display Options”** se puede personalizar la forma en la que los resultados serán mostrados. Se activará la opción **“Deformed”** y **“Overlay Undeformed”** para que se muestre la pieza original superpuesta a la deformada. Para extraer los resultados deseados basta con pinchar en el menú superior en **“File”** y seleccionar la opción **“Export/Image”** del menú desplegable. A continuación se mostrarán las capturas de los resultados y se realizará un breve comentario de cada uno de ellos.

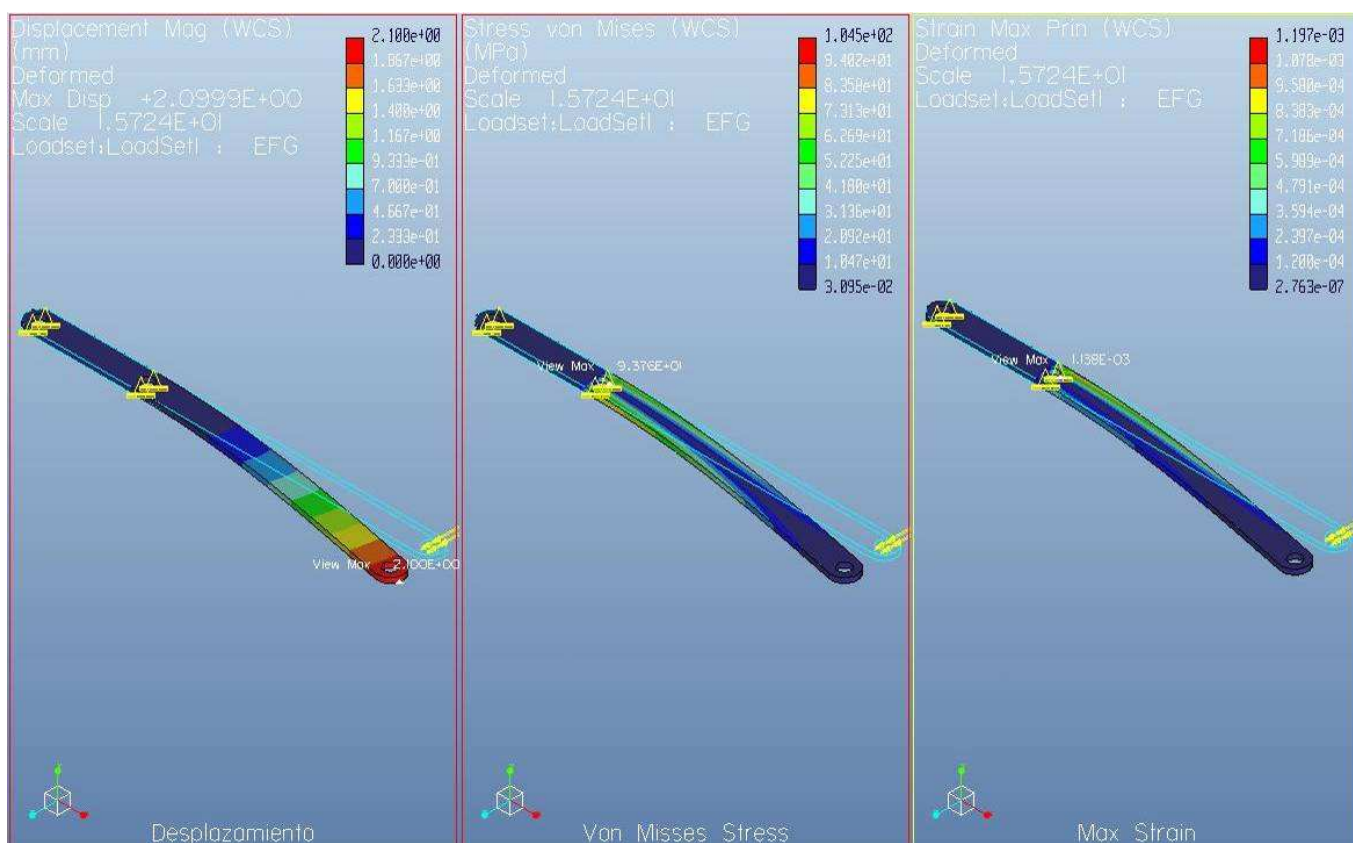


Ilustración 128. Resultados de PRO MECHANICA (Análisis Standard).

- **Desplazamiento:** Se observa en la parte izquierda de la ilustración 128 que los dos apoyos impiden que la fuerza aplicada genere desplazamientos entre dichos apoyos. El código de colores indica que el desplazamiento máximo, indicado en color rojo oscuro) se produce en el extremo del eslabón, justo en el punto en el que se aplica la carga. El valor del desplazamiento máximo alcanza el valor de 2,1 mm.

- **Tensión de Von Misses:** En la parte central de la ilustración 128 se puede ver la representación de la tensión de Von Misses. Siguiendo la leyenda de colores, donde el rojo indica la tensión máxima y el azul la tensión mínima, se puede observar claramente como las zonas de mayor tensión se localizan en las fibras exteriores del eslabón y en el punto próximo al apoyo central, siendo en la periferia del taladro en donde se puede apreciar una pequeña zona de color rojo o tensión máxima de valor 93,76Mpa.
- **Máxima deformación:** La representación de la máxima deformación (Max Strain) se puede observar en la parte derecha de la ilustración 128. El código de colores, como en todos los casos, muestra en color rojo el valor máximo y en azul el valor mínimo. La zona más deformada se localiza en la fibra más alejada en el eje Z (fibra superior) y en la zona más cercana al taladro siguiendo el eje X. El valor de de la deformación máxima es de $1,138 \cdot 10^{-3}$ unidades.

10.3 Análisis de optimización.

Una vez finalizado el análisis estático (New Static), PRO-E permite realizar un análisis de optimización. Para generar el nuevo análisis se pulsa en el icono **“Mechanica Analyses/Studies”** del menú superior. Aparecerá el ya conocido cuadro de diálogo de análisis. Se hace clic en el comando **“File”** y se despliega un menú que permite seleccionar los distintos tipos de análisis estructurales y térmicos. Como ya se ha realizado un análisis previo, esta vez se seleccionará un estudio de diseño.

Para poder realizar la optimización primero hay que realizar un análisis de sensibilidad o viabilidad (**“New Sensitivity Design Study”**) y seleccionar las cotas que se desean establecer como variables en los estudios de diseño. Más tarde serán las variables que se modificarán en el estudio de optimización.

Tras el análisis de viabilidad se realizará un análisis de optimización (**“New Optimization Design Study”**). Se abrirá un cuadro de diálogo en el que se podrá escoger entre estudio de optimización o viabilidad (bajo el comando “Type”), minimizar

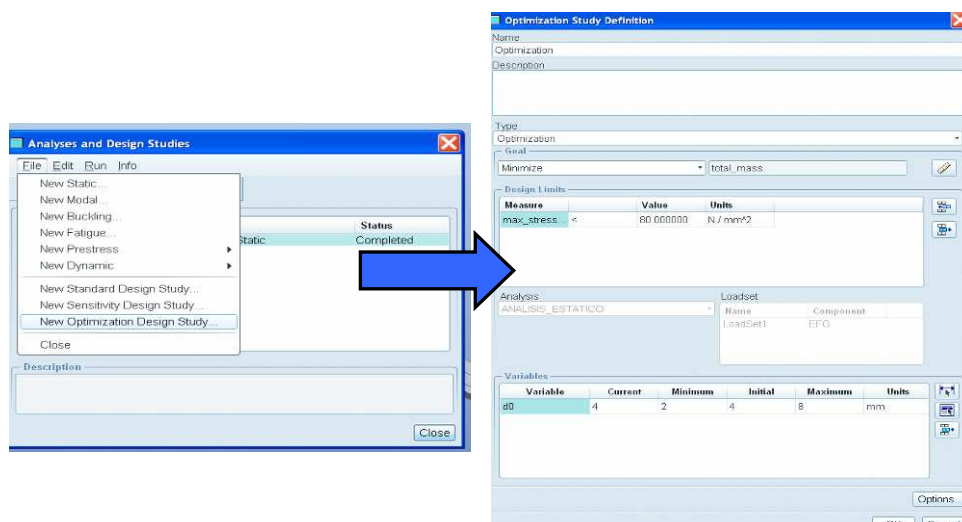


Ilustración 129. Cuadro de diálogo del análisis de optimización.

o maximizar una variable (bajo el comando “Goal”), establecer límites al diseño (bajo el comando “Design Limits”) y seleccionar las variables que se van a modificar (comando Variables). El proceso de definición del análisis se muestra en la ilustración 129.

El análisis de optimización que se ha llevado a cabo en este proyecto consiste en la minimización de la masa total (cuya medida puede ser llevada a cabo mediante el comando “**Mass**”). El eslabón original tiene una masa de $6,75 \cdot 10^{-2}$ kg. Los límites de diseño se han establecido en 85MPa para la máxima tensión de Von Misses y 1,5mm de máximo desplazamiento. Las variables de diseño serán las cotas seleccionadas en el análisis de viabilidad previo, que para el presente caso será el espesor del eslabón. Al seleccionar la variable, el programa pide un rango en el que moverse para encontrar la solución óptima. El valor original del espesor es de 4mm y se ha establecido en el rango de 3 a 10mm para optimizar la medida.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras el análisis de optimización. Los resultados que aparecen en la ilustración 130 han sido obtenidos siguiendo los parámetros de actuación indicados en el apartado 2 de este mismo capítulo. Se puede ver un historial del proceso iterativo de optimización pinchando en el botón “**Display study status**” del cuadro de diálogo de análisis. En dicho historial podemos encontrar la cota para la que se han obtenido los parámetros optimizados. El nuevo espesor de la pieza resulta ser de 5,585mm y se ha conseguido tras 5 análisis iterativos con una duración total de 131,82 segundos de tiempo de cálculo.

Se observa en la ilustración 130, de izquierda a derecha, el gráfico de desplazamiento, tensión de Von Misses y máxima deformación. En este caso, los parámetros estaban restringidos a 1,5mm de desplazamiento y 85Mpa de tensión máxima (de Von Misses). Se observa que en el primero de los casos, el valor obtenido está justo en el límite con un valor de 1,5mm. Para este valor, la tensión máxima obtenida es de 70Mpa, que es una tensión inferior al límite impuesto. La deformación máxima también se reduce y alcanza un valor extremo de $8,48 \cdot 10^{-4}$. Por último, la medición de masa para las nuevas características del eslabón es de $7 \cdot 10^{-2}$ kg.

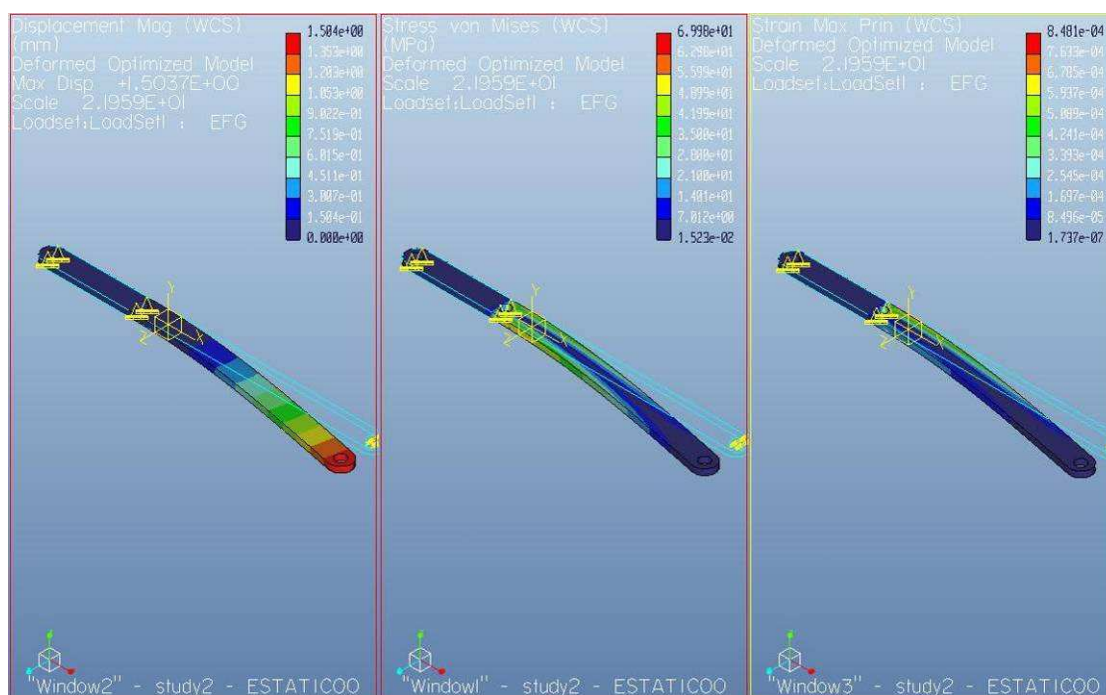


Ilustración 130. Resultados del análisis de optimización.

CAPITULO 11. Conclusiones y futuros desarrollos.

11.1 Conclusiones.

Este proyecto parte de la síntesis de mecanismos realizada previamente en el proyecto de Jorge Tierno Alvite [1]. En dicho proyecto se seleccionaron 5 posibles mecanismos válidos para funciones de pick & place y se trabajó con uno de ellos. En el presente proyecto se han modelado los 5 mecanismos mediante el programa PRO-E. Se ha hecho uso del módulo integrado PRO/ MECHANISM para realizar un análisis cinemático, dinámico y energético de los diferentes mecanismos. Tras ello, se ha realizado un pequeño análisis de elementos finitos sobre un eslabón individual con el objetivo de conocer el funcionamiento del módulo integrado PRO/ MECHANICA. Tras los diferentes análisis llevados a cabo se concluye que:

- El módulo PRO/ MECHANISM permite hacer simulaciones de movimiento y cálculos de mecánica newtoniana en ensamblajes creados con PRO-E. Los resultados obtenidos han sido comprobados con el programa WM2D para verificar el buen funcionamiento de PRO-E (herramienta de reciente adquisición en la universidad).
- El módulo PRO/ MECHANICA permite realizar análisis de elementos finitos tanto en piezas individuales como en ensamblajes completos realizados con PRO-E. Con este módulo se obtienen gran cantidad de información a nivel de esfuerzos y resistencia de materiales. Además permite realizar estudios de optimización y fatiga que pueden completar el diseño mecánico de forma muy interesante.
- La tarea de pick & place diseñada debe cumplir con dos requisitos. El movimiento deberá de ser suave y deberá también gozar de flexibilidad para conseguir una buena relación entre altura y alcance obtenidos. Los mecanismos 2 y 5 se excluirían de la selección por presentar un movimiento poco controlado y con un carácter brusco. El mecanismo 4, aunque su trayectoria podría considerarse útil para alguna aplicación más exclusiva o rígida, presenta recorridos más cortos que otros mecanismos. Por tanto, **los mecanismos 1 y 3 son los que más se ajustan a los parámetros de selección** que marca la tarea de pick & place escogida. Tras el análisis dinámico, se observa que las reacciones en el mecanismo 1 son mayores que en el mecanismo 3, este último con un crecimiento de las reacciones más gradual aunque con 2 zonas críticas. El par motor necesario para realizar la tarea de pick & place en el mecanismo 3 es menor que en el mecanismo 1. Por todo ello, el mecanismo seleccionado como óptimo para la función de pick & place que se contempla en este proyecto es el **MECANISMO 3** con un par motor de al menos **32899N·mm**.
- El **estudio energético** de cada mecanismo muestra que existe una demanda energética importante durante el instante crítico del mecanismo y sus proximidades. En el resto de zonas, la sollicitación energética es reducida y presenta un valor relativamente bajo comparado con el pico de energía que se obtiene en el instante crítico.

11.2 Futuros desarrollos.

El presente proyecto pretende abordar todas las fases de desarrollo de un elemento en ingeniería. Las fases en que se ha desarrollado el proyecto no abarcan la totalidad de las fases de diseño, abordando exclusivamente las fases principales, es decir, análisis de movimiento, análisis de cargas, y análisis de energía. Para completar todas las fases del desarrollo del diseño de mecanismos para funciones de pick & place se proponen a continuación una serie de futuros desarrollos:

- Una optimización en cuanto a la síntesis dimensional podría revelar información interesante de cara a mejorar el diseño. Se ha probado el módulo de PRO/ MECHANICA con la optimización de un eslabón en el capítulo 10. El análisis muestra que con un incremento mínimo del espesor, se obtienen deformaciones mucho menores y que el desplazamiento se reduce considerablemente. Por tanto, un análisis más completo de cada mecanismo individualizado podría aportar una gran cantidad de valiosa información.
- Siguiendo el mismo criterio que en el apartado anterior, sería interesante realizar una optimización a cada mecanismo para obtener la mejor síntesis dimensional, así como tratar de profundizar en los algoritmos de optimización que permite el software.
- PRO/ MECHANICA también presenta un módulo térmico. Sería de interés probar las posibilidades que ofrece así como comprobar el comportamiento del mecanismo sometido a determinadas sollicitaciones térmicas especialmente a nivel de motores.
- Realizar un análisis similar al de este proyecto con mecanismos ya existentes en la industria con el fin de comprobar los nuevos modelos y ver sus ventajas.
- Profundizar en la creación de funciones y análisis definidos mediante parámetros en el módulo PRO/ MECHANISM, el cual, además, permite exportar cargas a PRO/ MECHANICA.

CAPITULO 12. Presupuesto.

El presupuesto detallado a continuación engloba los costes aplicables al proyecto. El proyecto se desarrollará en el plazo de **7 meses con un presupuesto de 33.891,95€**



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Escuela Politécnica Superior

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: Daniel Gutiérrez Castro

2.- Departamento: Ingeniería Mecánica.

3.- Descripción del Proyecto:
- Título: Modelado y análisis de mecanismos para funciones de pick & place.
- Duración (meses): 7 meses
- Tasa de costes Indirectos: 20%

4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):
Euros 33.891,95 €

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F.	Categoría	Dedicación (meses) ¹⁾	(hombres)	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Cristina Castejón Sisamón		Ingeniero Senior		1	4.289,54	4.289,54	
María Jesús Gómez García		Ingeniero Senior		1	4.289,54	4.289,54	
Daniel Gutiérrez Castro		Ingeniero		7	2.694,39	18.860,73	
Hombres mes 9				Total		27.439,81	

¹⁾ 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)
Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ²⁾
Ordenador para trabajo	599,00	100	7	60	69,88
Licencia PRO/ ENGINEER	6.199,00	100	7	60	723,22
Licencia Office 2007	89,00	100	7	60	10,38
					0,00
					0,00
					0,00
Total					803,48

²⁾ Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = n° de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado
B = periodo de depreciación (60 meses)
C = coste del equipo (sin IVA)
D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Total		0,00

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO³⁾

Descripción	Empresa	Costes imputable
Total		0,00

³⁾ Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	27.440
Amortización	803
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos	5.649
Total	33.892

El ingeniero proyectista:

Fdo. Daniel Gutiérrez Castro
Leganés a 25 de Mayo de 2011

Bibliografía y referencias.

- [1] Tierno Alvite, J. “Diseño del brazo mecánico eficiente mediante optimización multiobjetivo”, proyecto fin de carrera, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [2] Información sobre la tarea de Pick & Place: <http://www.rockwellautomation.com/> (última visita 03/02/2011)
- [3] IEEE and Fraunhofer IPA Database on Service Robots: <http://www.ipa.fhg.de/srdatabase/> (última visita 04/03/2011)
- [4] Robotian: A Cyber robot museum: <http://www.robotian.com/> (última visita 16/04/2011)
- [5] Nuevas aplicaciones de la robótica. Robots de servicio. Antonio Barrientos. DISAM-UPM. 2004
- [6] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer, R. Aracil. Fundamentos de Robótica. Mc Graw-Hill, Valrealty, Basauri, 17, 1ª planta, 28023 Aravaca (Madrid), 1997.
- [7] C. Castejon, G. Carbone, J. G. Prada, and M. Ceccarelli. A Multi-Objective Optimization Design for a 4R Service Robot. International Journal of Mechanics and Control, Vol.08, N.02, pp..3-8, 2007.
- [8] C. Castejon, G. Carbone, J. G. Prada, and M. Ceccarelli. A Multi-Objective Optimization for Designing Service Robots. 12th World Congress in Mechanism and Machine Science IFToMM 07, Besançon, paper n.A496, 2007.
- [9] C. Castejon, G. Carbone, J. G. Prada, and M. Ceccarelli. Computational Multi-Objective Optimization to Design Service Robots. Proceedings of EuCoMeS08, the Second European Conference on Mechanism Science, Springer, Dordrecht, pp.139-148, 2008.
- [10] Nasa Space Telerobotics Programe (ultima visita 01/04/2011) http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/telerobotics.shtm:
- [11] International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC): <http://www.iaarc.org/> (última visita 01/04/2011)
- [12] Integrated Surgical Systems, Inc.: <http://www.robodoc.com/> (última visita 01/04/2011)
- [13] J.E. Shigley, C.R. Mischke. Diseño en ingeniería mecánica. 5º edición (4ª en español)

- [14] R.L. Norton. Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de maquinas y mecanismos. 3ª Edición. Mc Graw Hill, 2005.
- [15] A. de Lamadrid, A. del Corral. Cinemática y dinámica de maquinas. 6ª edición. Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Industriales , 1989
- [16] J-C. García-Prada, C. Castejón, H. Rubio. Teoría de Máquinas y Mecanismos. 1ª edición. Ediciones Paraninfo. S.A, 2007.
- [17] J.E. Shigley. Teoría de Máquinas y Mecanismos. Mc Graw Hill (1988)

ANEXOS:

A-1 Planos de elementos.

A-2 Explosionado de los mecanismos.

A-1. PLANOS DE ELEMENTOS:

En el presente anexo se presentará un plano general que describirá las dimensiones de los mecanismos estudiados en el proyecto. En el plano general, las cotas variables se han designado mediante letras rodeadas de un círculo. En la tabla A1.1 se muestra una lista con los elementos utilizados y el número de éstos.

Mecanismo	Elemento	Nº	Comentarios
1	Eslabón de 3 conexiones	1	
	Eslabón de 2 conexiones	3	
	Eslabón corredera	1	La guía de la corredera tendrá una longitud de 650mm, 10mm de ancho y una profundidad de 1mm para alojar la cabeza cuadrada del bulón corredera. La distancia entre el taladro y el inicio de la corredera es de 50mm.
	Arandela	7	d_{int} 10mm; d_{ext} 30mm; grosor 2mm
	Bulón	5	Será necesario 1 casquillo para evitar holgura en la unión efectuada por el bulón largo. Uno de los bulones (corredera) tendrá cabeza cuadrada de grosor 1mm y lado 12mm
	Arandela de cierre	9	d_{int} 10mm; grosor 0,5mm
2	Eslabón de 3 conexiones	2	Uno de ellos es un triángulo cuyas dimensiones se detallan en la tabla A1.2
	Eslabón de 2 conexiones	2	
	Eslabón corredera	1	Se define como un eslabón de 2 conexiones con una guía centrada de ancho 10mm y 210mm de largo.
	Arandela	6	d_{int} 10mm; d_{ext} 30mm; grosor 2mm
	Bulón	6	Serán necesarios 2 casquillos para evitar holgura en la unión efectuada por el bulón largo y corredera. Uno de los bulones (corredera) tendrá cabeza cuadrada de grosor 1mm y lado 12mm
	Arandela de cierre	11	d_{int} 10mm; grosor 0,5mm
3	Eslabón de 3 conexiones	2	
	Eslabón de 2 conexiones	4	
	Arandela	8	d_{int} 10mm; d_{ext} 30mm; grosor 2mm
	Bulón	6	Será necesario 1 casquillo para evitar holgura en la unión efectuada por el bulón más largo.
	Arandela de cierre	12	d_{int} 10mm; grosor 0,5mm
4	Eslabón de 3 conexiones	2	
	Eslabón de 2 conexiones	2	
	Eslabón corredera	1	Se define como un eslabón de 2 conexiones con una guía centrada de ancho 10mm y 250mm de largo.
	Arandela	6	d_{int} 10mm; d_{ext} 30mm; grosor 2mm
	Bulón	6	Serán necesarios 2 casquillos para evitar holgura en la unión efectuada por el bulón largo y corredera. Uno de los bulones (corredera) tendrá cabeza cuadrada de grosor 1mm y lado 12mm
	Arandela de cierre	11	d_{int} 10mm; grosor 0,5mm
5	Eslabón de 4 conexiones	1	
	Eslabón de 3 conexiones	1	Uno de ellos es un eslabón-corredera con una guía 10mm de ancho y 220mm de largo situada a 20mm del primer taladro.
	Eslabón de 2 conexiones	2	
	Arandela	5	d_{int} 10mm; d_{ext} 30mm; grosor 2mm
	Bulón	6	Será necesario 1 casquillo para evitar holgura en la unión efectuada por el bulón largo y corredera. Uno de los bulones (corredera) tendrá cabeza cuadrada de grosor 1mm y lado 12mm
	Arandela de cierre	11	d_{int} 10mm; grosor 0,5mm

Tabla A1.1. Lista de materiales

A continuación, en la tabla A1.2 se muestran las dimensiones de los elementos del mecanismo. Estas dimensiones se corresponden con los planos que aparecen en la ilustración 131. En dichos planos no se han incluido piezas de catálogo tales como casquillos, arandelas, arandelas de cierre ni se ha hecho distinción entre bulón de corredera y bulón simple. La única diferencia que existe entre ambos bulones es que el bulón corredera presenta en uno de sus lados una cabeza cuadrada de 12mm de lado y 1mm de espesor que encaja en la guía y permite su deslizamiento.

MECANISMO	ELEMENTO	COTAS (mm) <i>ver ilustración 131</i>				
		A	B	C	D	E
1	AB	150				
	BE	170				
	CD		100	50		
	DE	170				
	CF		700	50	CORR. 650mm	
	BULÓN CORR.					15
2	AB	100				
	AC	60				
	BEF	250				
	CED	Eslabón triangular de 3 conex.				
	FDG		480	165		
	BULÓN CORR.					15
3	AB	150				
	AC	80				
	BDE		210	75		
	CD	170				
	DF	210				
	EFG		310	86		
	BULÓN EXTRA					22
4	AB	100				
	AG	250	CORREDERA DE 250mm			
	CE	150				
	DCB		130	65		
	GEF		400	140		
	BULÓN CORR.					15
5	ABC			100	50	
	AD	220mm CORR		260	20	.
	BE	120				
	CF	150				
	DEFG		360	103	64	
	BULÓN CORR.					21
ELEMENTOS COMUNES	BULÓN CORTO					10
	BULÓN LARGO					16

Tabla A.1.2. Dimensiones de los elementos

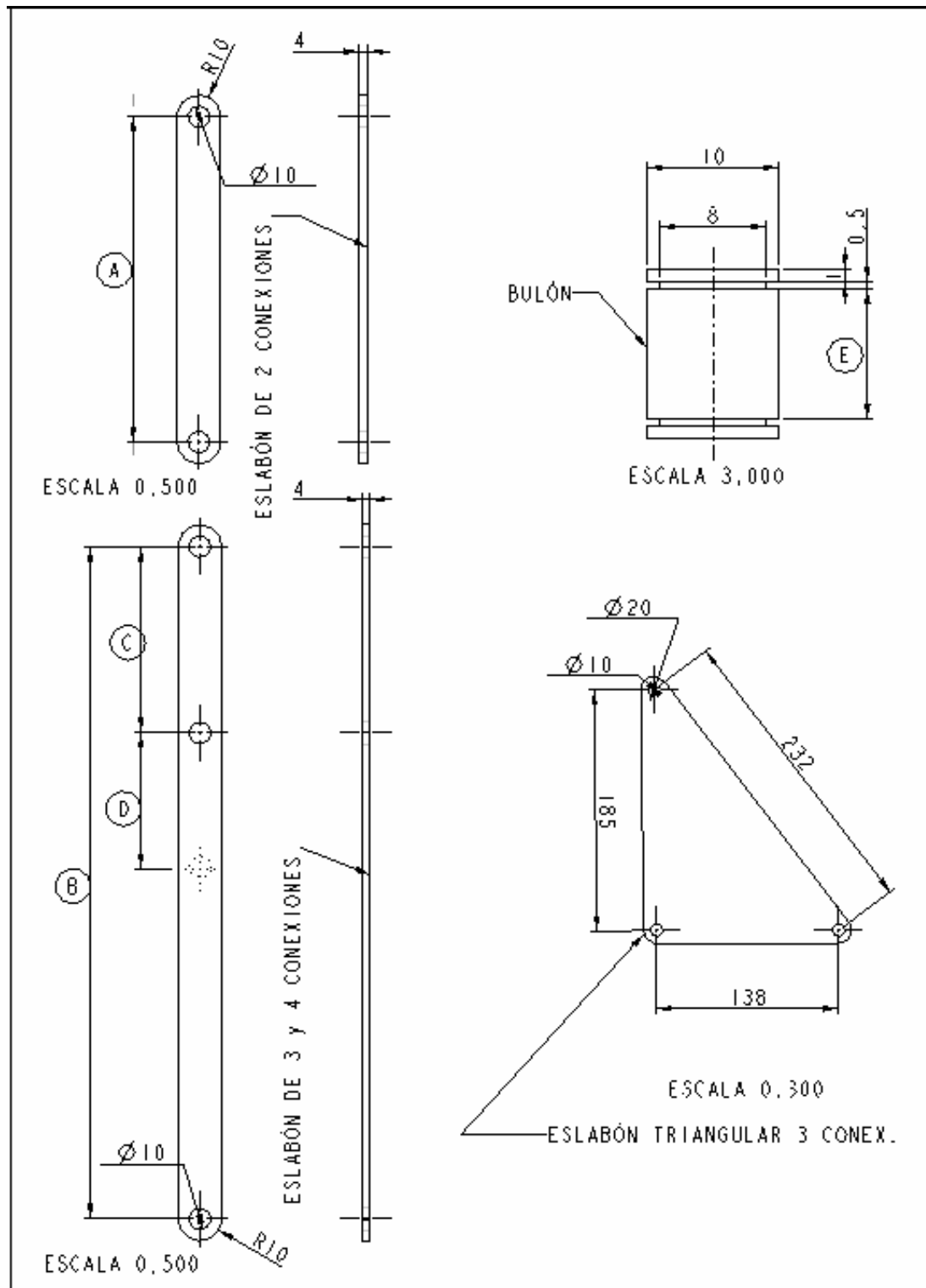
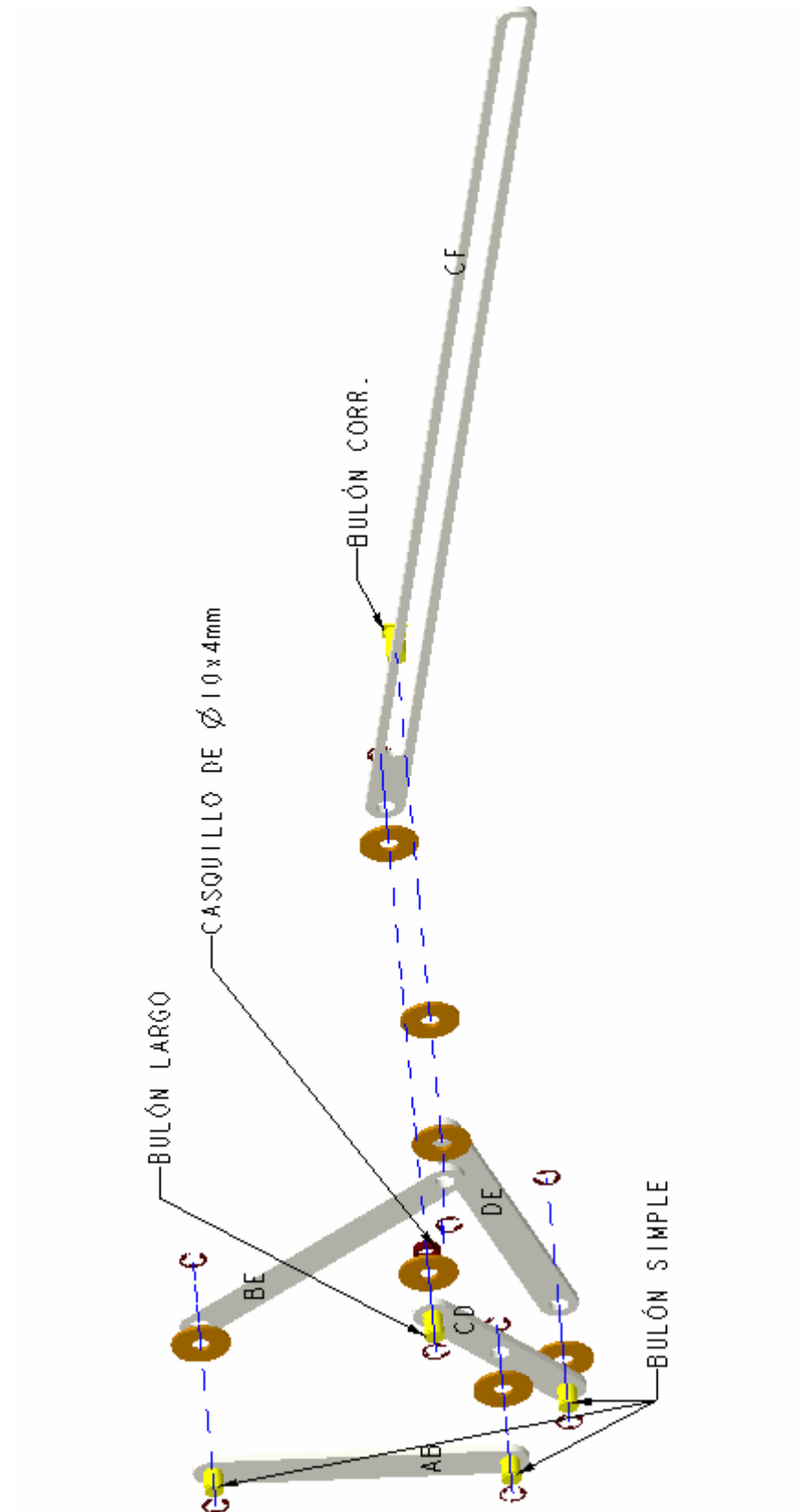


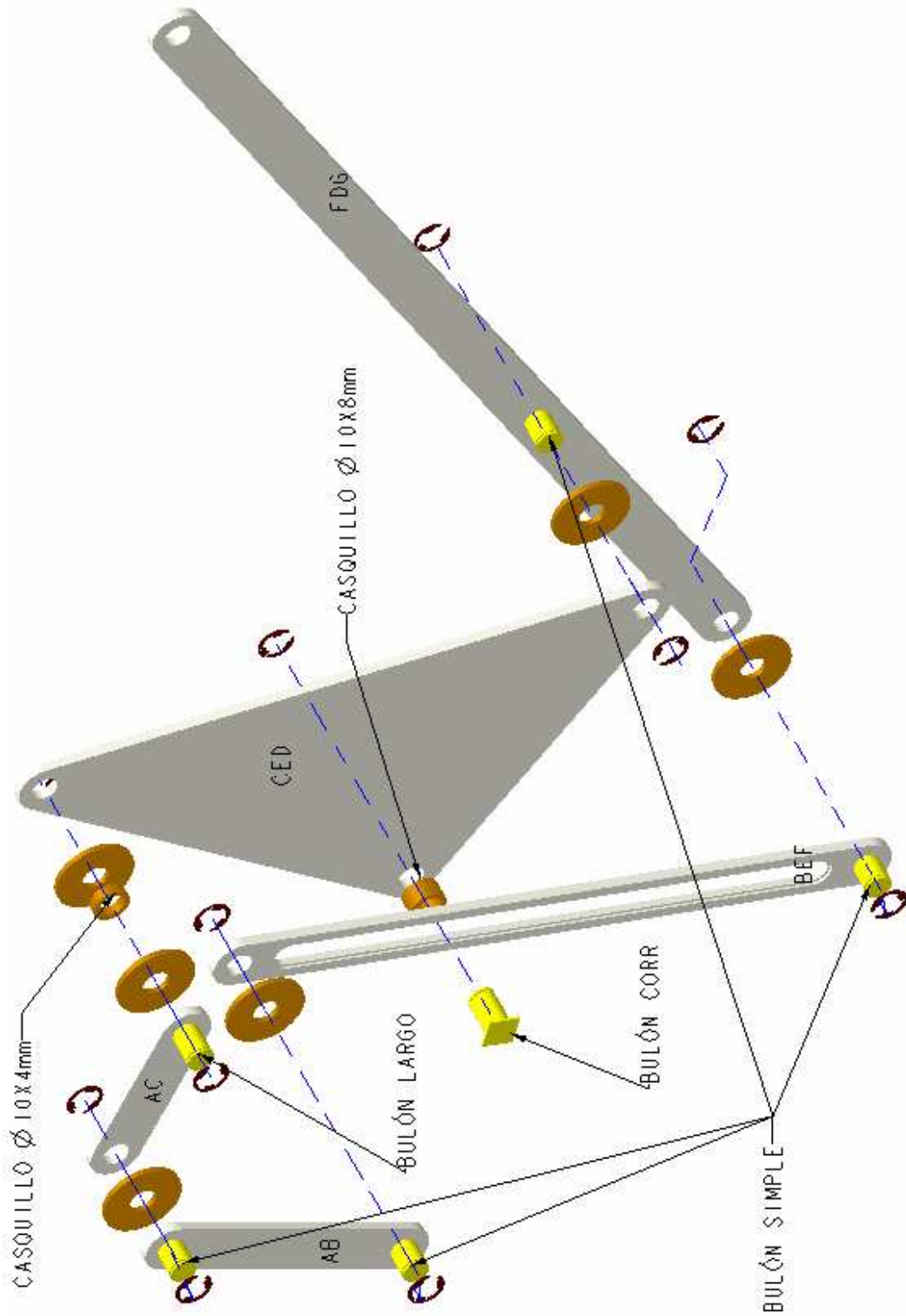
Ilustración 131. Planos generales de los elementos de construcción.

A-2. EXPLOSIONADO DE LOS MECANISMOS:

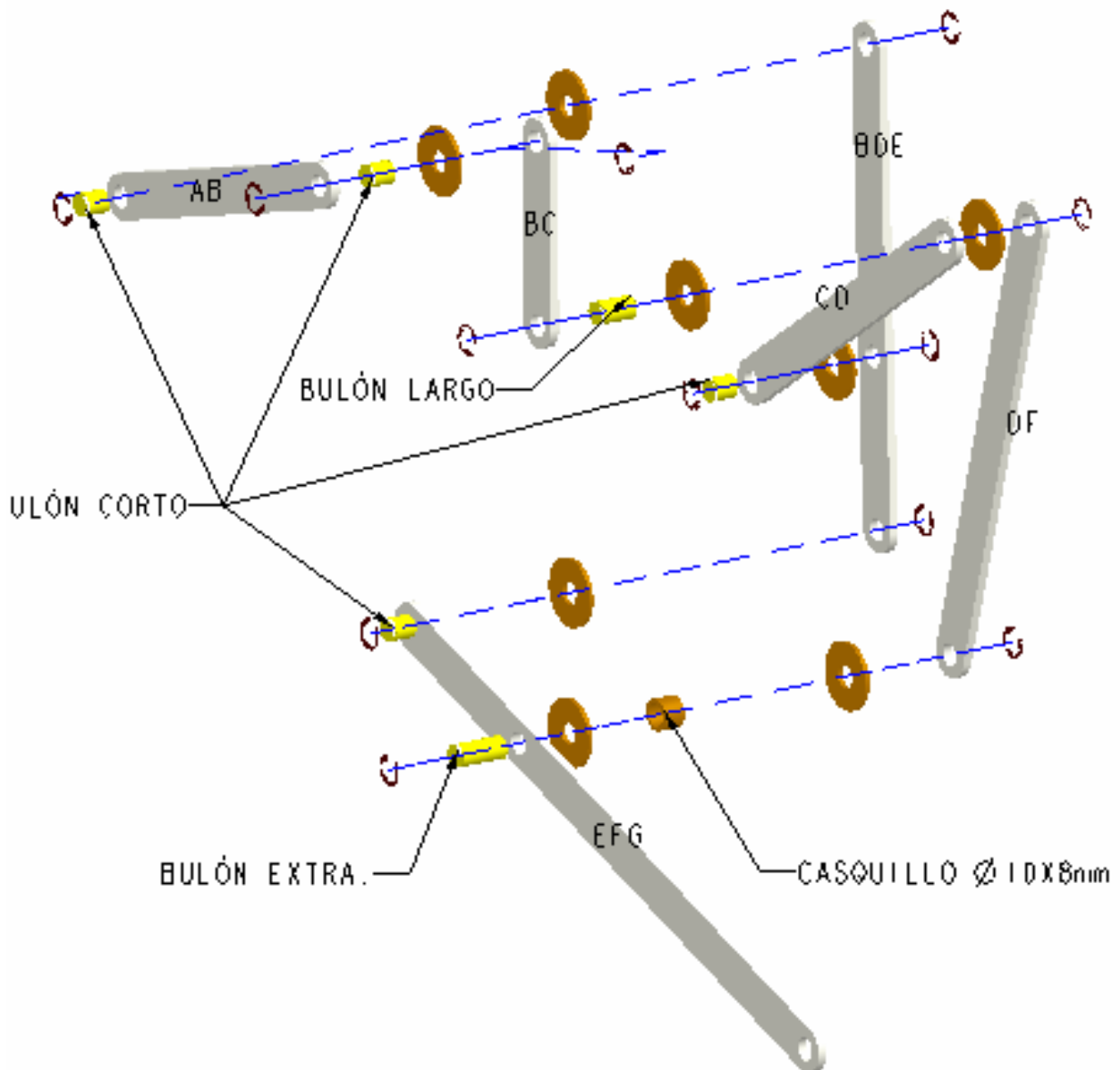
MECANISMO 1:



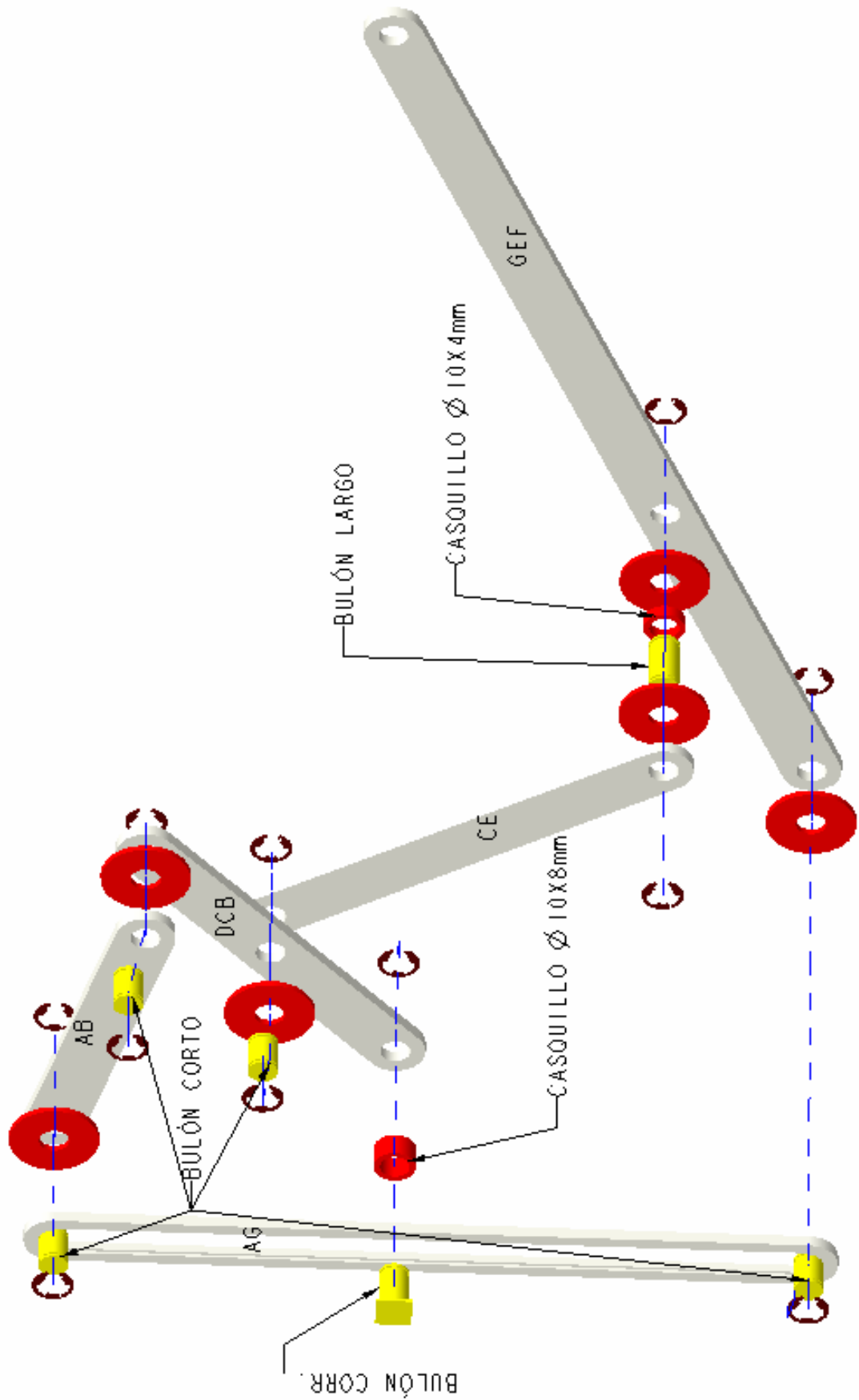
MECANISMO 2:



MECANISMO 3:



MECANISMO 4:



MECANISMO 5:

